

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

**Г. Б. Беляев**

# В.Ф.Кузищин

# Н.И.Смирнов

# ТЕХНИЧЕСКИЕ

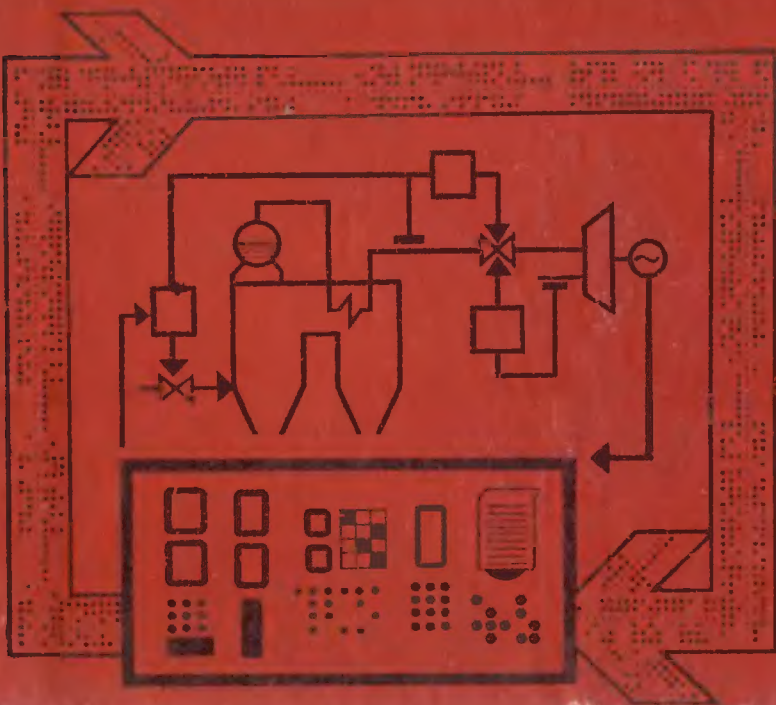
# СРЕДСТВА

# АВТОМАТИЗАЦИИ

# В ТЕПЛО-

# ЭНЕРГЕТИКЕ

**Для студентов вузов**



ББК 31.37

Б 43

УДК [681.51:621.311.22](075.8)

**Рецензенты:**

Кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов Одесского политехнического института, Шальман Л. М.

**Беляев Г. Б. и др.**

**Б 43** Технические средства автоматизации в теплоэнергетике: Учеб. пособие для втузов/Г. Б. Беляев, В. Ф. Кузнецин, Н. И. Смирнов. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с., ил.

В пер. 80 к.

В книге рассмотрены автоматические системы регулирования (АСР) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Изложены принципы действия приборов, устройств и механизмов, применяющихся для построения АСР и средств вычислительной техники.

Книга является учебным пособием для студентов специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» и может быть использована эксплуатационным персоналом тепловых электростанций.

Б 2303000000-277  
051(01)-82 5-82

ББК 31.37  
6П2.11

© Энергоиздат, 1982

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматизация является одним из важнейших факторов роста производительности труда в промышленном производстве. Поэтому во всех документах и планах, определяющих развитие народного хозяйства СССР, ускорению темпов автоматизации промышленного производства неизменно уделяется большое внимание. Непременным условием ускорения темпов роста автоматизации является развитие технических средств автоматизации. К техническим средствам автоматизации относятся все устройства, входящие в систему управления и предназначенные для получения информации, ее передачи, хранения и преобразования, а также для осуществления управляющих и регулирующих воздействий на технологический объект управления.

Основное внимание в настоящей книге уделяется техническим средствам, применяемым для автоматизации непрерывных процессов в теплоэнергетике, а также в металлургии, химии и в других отраслях промышленности. При этом основное внимание уделяется описанию принципов организации и построения типовых комплексов средств автоматизации и изложению принципов действия основных блоков и модулей в рамках таких комплексов. Рассматриваются современные поколения средств автоматизации, предназначенные для построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Содержание книги соответствует программе курса «Технические средства автоматизации», читаемого для студентов, специализирующихся по профилю «Автоматизация теплоэнергетических процессов».

При написании книги использован многолетний опыт чтения авторами аналогичного курса лекций в Московском ордена Ленина и ордена Октябрьской революции энергетическом институте.

Книга написана по инициативе Лауреата Государственной премии заведующего кафедрой АСУ ТП, профессора Е. П. Стефани.

Введение, главы 1 и 2, а также § 5.9 написаны Г. Б. Беляевым, главы 3 и 4 — В. Ф. Кузициным, главы 5 и 6 — Н. И. Смирновым.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам: заведующему кафедрой автоматизации теплоэнергетических процессов Одесского политехнического института, канд. техн. наук, доценту Ю. К. Тодорцеву, сотрудникам той же кафедры канд. техн. наук, доценту М. Б. Призанду, старшему преподавателю В. М. Юсиму, а также канд. техн. наук Л. М. Шальману (НИИ теплоприбор) за ценные замечания и предложения, способствовавшие улучшению качества книги.

Авторы благодарны канд. техн. наук, старшему преподавателю кафедры АСУ ТП МЭИ В. Р. Сабанину за большую работу, проделанную им при научном редактировании, а также всем сотрудникам кафедры, принимавшим участие в обсуждении рукописи.

Все замечания и предложения по книге просим направлять по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, Энергониздат.

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие технических средств автоматизации является сложным процессом, в основе которого лежат интересы автоматизируемых производств-потребителей, с одной стороны, и экономика и возможности предприятий-изготовителей средств, — с другой. Первичным стимулом развития является повышение эффективности работы производств-потребителей за счет внедрения новой техники автоматизации. Однако разработка и производство такой техники могут быть целесообразными только при условии быстрой окупаемости затрат. Поэтому критерием всех решений по разработкам и внедрению новых средств должен быть суммарный ожидаемый экономический эффект с учетом всех затрат на разработку, производство и внедрение. Соответственно к разработке, изготовлению и внедрению следует принимать прежде всего те варианты технических средств, которые обеспечат максимум суммарного эффекта.

При строгом выполнении такого принципа разработки и внедрения новых средств процесс их развития являлся бы строго оптимальным и, как следствие этого, объективным. Однако достаточно строгое обоснование оптимальности средств на стадии их разработки и внедрения практически невозможно из-за сложности и ограниченной точности оценок суммарного ожидаемого эффекта. Поэтому единственным объективным критерием оптимальности новых средств может быть только широкий опыт их практической эксплуатации, который и позволяет отбросить неудачные решения и выделить, сохранить и развить те принципы, схемы и конструкции, которые в целом соответствуют требованиям максимальной экономичности.

Наличие такого критерия позволяет рассматривать развитие технических средств как в целом объективный процесс. Соответственно постоянно обновляющиеся составы технических средств автоматизации и их техниче-



ские характеристики могут расцениваться как приближающиеся в среднем к оптимальным на данной ступени развития материального производства.

В развитии экономических предпосылок внедрения и использования автоматизации и соответственно в развитии технических средств автоматизации можно выделить три характерных периода: начальный этап, этап комплексной механизации и автоматизации и этап автоматизированных систем управления.

Для начального этапа характерны избыток дешевой рабочей силы, низкая производительность труда, малая единичная мощность агрегатов и установок. Все это делает экономически целесообразным самое широкое участие человека в процессах управления материальным производством. Поэтому наблюдение за объектом, принятие и исполнение управляющих решений осуществлялось с применением физического и умственного труда. Механизации и автоматизации подлежали только те отдельные процессы и операции, управление которыми человек не мог осуществлять достаточно надежно по своим психофизиологическим данным. Так, механизация исполнения команд (прообраз современного дистанционного управления) применялась только в тех случаях, когда мощность мускульных усилий человека не обеспечивала необходимой надежности и оперативности исполнения. Автоматизация управления затрагивала только стабилизацию параметров повышенной аварийной опасности (таких как уровень воды и давление пара в котлах, частота вращения паровых турбин и т. п.).

Рис. В.1. Регулятор скорости вращения турбины (прямого действия).

1 — регулятор; 2 — турбина; 3 — датчик скорости; 4 — регулирующий клапан.

В целом начальный этап был этапом механизации и автоматизации отдельных процессов. Применение автоматизации не носило массовый характер, а объем при-

меняемых технических средств был ничтожен и их производство не являлось самостоятельной отраслью. Тем не менее именно на этом этапе сформировались некоторые современные принципы построения низших уровней автоматизации, и в частности основы современного дистанционного управления с использованием электрических, пневматических и гидравлических двигателей для привода запорно-регулирующей арматуры. Переход к такому приводу вызвал переход от регуляторов прямого действия, использовавших для перемещения регулирующего органа энергию самой регулируемой величины (рис. В.1), к более удобным в эксплуатации регуляторам косвенного действия (рис. В.2).

Отметим характерную для данного этапа особенность реализации схемы регулирования. Все элементы и блоки, входящие в схему, komponуются в конструктивно едином устройстве — регуляторе. Такие типы компоновки средств регулирования используются на ряде объектов и агрегатов с относительно простыми задачами управления, причем в подобных случаях применяются иногда и регуляторы прямого действия.

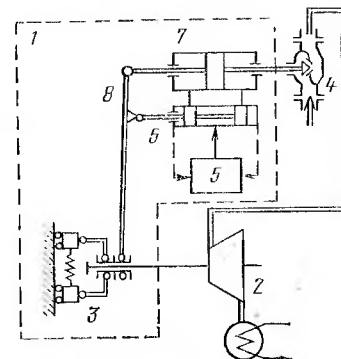


Рис. В.2. Гидравлический регулятор скорости вращения турбины (косвенного действия).

1 — регулятор; 2 — турбина; 3 — датчик скорости; 4 — регулирующий клапан; 5 — масляный насос; 6 — золотник; 7 — гидравлический двигатель; 8 — рычаг жесткой обратной связи.

В крупном промышленном производстве становятся целесообразными отказ от использования мускульной энергии человека для привода исполнительных устройств и освобождение его от рутинных, монотонных, все время повторяющихся операций по стабилизации технологических параметров.

Переход ко второму этапу — этапу комплексной автоматизации и механизации производства происходит в условиях роста производительности труда, укрупнения единичных мощностей агрегатов и установок и развития материальной и научно-технической базы автоматизации. Теперь человек-оператор в управлении все больше занимается умственным трудом, выполняя разнообраз-

ные логические операции при пусках и остановках объектов, особенно при возникновении всевозможных непредвиденных обстоятельств и предаварийных и аварийных ситуаций, а также оценивая состояние объекта, контролируя и резервируя работу автоматических систем.

На данном этапе формируются основы крупносерийного производства технических средств автоматизации, ориентированного на широкое применение стандартизации, специализации и кооперации. Широкие масштабы

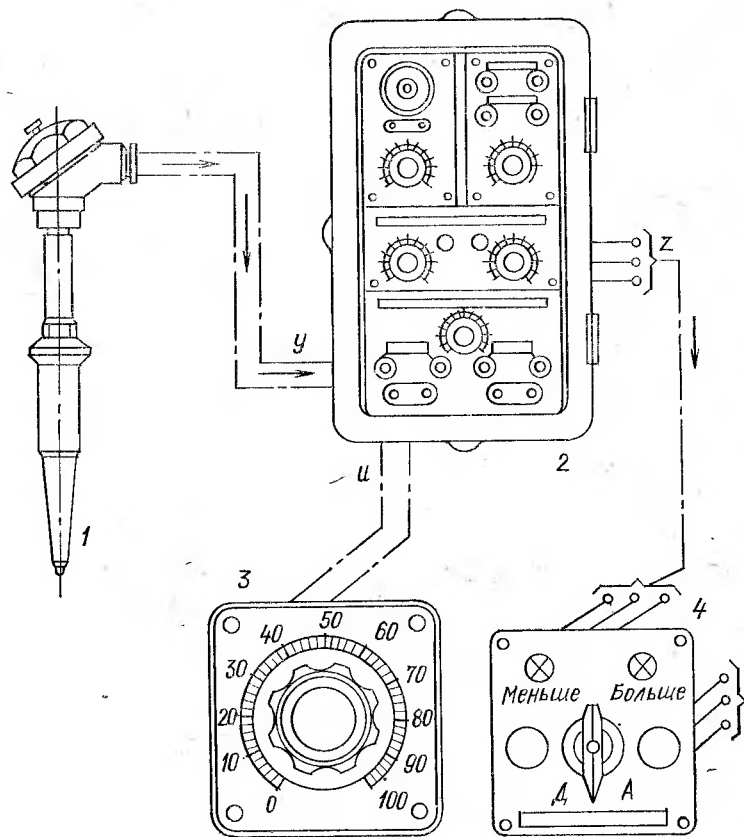
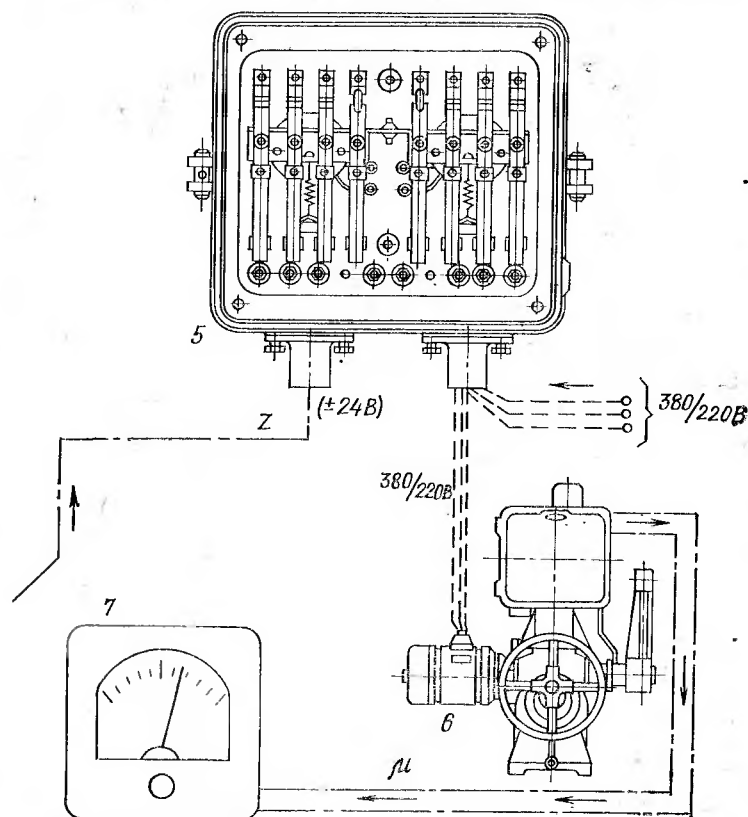


Рис. В.3. Электрический регулятор

1 — датчик (по месту измерения); 2 — электронный регулирующий блок (на пульте управления); 3 — задатчик (на пульте управления); 4 — блок ручного щита; 5 — магнитный пускатель (на местном щите); 6 — электрический исполнительный механизм (по месту воздействия); 7 — индикатор (на пульте).

производства средств автоматизации и известная специфика их изготовления приводят к постепенному выделению этого производства в самостоятельную отрасль.

Различные элементы, реализующие схему регулирования, не комбинируются в едином устройстве, а изготавливаются в виде ряда взаимосопрягающихся блоков (рис. В.3). Для построения регулятора требуются дополнительный монтаж и коммутация блоков. Это выгодно потребителю, так как позволяет разместить различные части оборудования автоматической системы в соответствии с оптимальными условиями работы и удобством эксплуатации и обслуживания, что оказывается выгодным и для производства средств автоматизации. Раз-



температуры пара.

ниге регуляторов); 3 — задатчик (на пульте управления); 4 — блок ручного щита; 6 — электрический исполнительный механизм (по месту воздействия); 7 — индикатор (на пульте).

деление сложных устройств — регуляторов на отдельные функциональные составляющие — блоки позволяет перейти к агрегатированию выпускаемой продукции. Все расширяющиеся масштабы производства и применения средств автоматизации приводят к необходимости унификации схемных и конструктивных решений выпускаемой продукции.

Отдельные блоки автоматической системы осознанно создаются как вычислительные устройства с жесткой программой и, в подавляющем большинстве случаев, как аналоговые. Использование аналогового принципа преобразования информации предопределяет применение локальных схем регулирования, где каждый регулирующий контур выполняется конструктивно самостоятельным (каждому контуру — свой регулятор).

Развитие электронной техники и широкое использование электроэнергии и электропривода стимулирует преимущественное развитие на данном этапе электрических средств регулирования (с электрической энергией как в качестве носителя информации, так и для питания исполнительных устройств).

Третий (современный) этап развития автоматизации может быть определен как этап автоматизированных систем управления (АСУ), появление которых совпало с началом научно-технической революции. На данном этапе становится целесообразной автоматизация все более сложных функций управления. Для этого потребовались автоматы высокого уровня, автоматы, способные осуществлять сложные вычислительные и логические операции преобразования информации. Центральной частью, основой таких автоматов стали программируемые цифровые вычислительные машины (ЭВМ). Дополненные устройствами связи с объектом управления ЭВМ образуют информационно-управляющий вычислительный комплекс, являющийся технической основой современных АСУ (рис. В.4). Однако в большинстве отраслей, наряду с управляющими вычислительными машинами, для реализации простейших функций управления все еще используются и традиционные аналоговые средства автоматизации.

Перспективными средствами отображения информации становятся электронно-лучевые индикаторы (дисплеи). Новая техника отображения информации позволяет отказаться от громоздких мнемосхем и резко сокра-



Рис. В.4. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) с вычислительным комплексом.

1 — автоматические регуляторы; 2, 3, 5, 6 — показывающие и самопишущие приборы; 4 — органы настройки автоматики; 7 — цифровые индикаторы; 8 — электронно-лучевые индикаторы (дисплеи); 9 — сигнальные табло; 10 — мнемосхема технологического объекта; 11 — задатчики автоматических регуляторов; 12 — клавиатура наборных полей вызова параметров на цифровые приборы 7; 13 — средства диспетчерской связи; 14 — ключи дистанционного управления; 15 — электрифицированная печатающая машинка для регистрации параметров; 16 — кроссовый шкаф; 17 — шкафы информационно-управляющего вычислительного комплекса; 18 — пульт инженера-оператора ЭВМ.

тить количество приборов, сигнальных табло и индикаторов на щитах и пультах управления (рис. В.5).

Средства автоматического регулирования стареют физически относительно медленно. Большинство устройств автоматики при соблюдении правил эксплуатации и обслуживания имеют срок службы не меньший, чем срок морального износа основного оборудования. В то же время их моральная старость на современном этапе

наступает значительно быстрее и, как правило, значительно раньше того срока, на который рассчитано основное оборудование. Часто все же оказывается целесообразным оставлять морально устаревшие средства автоматизации на тех самых объектах, где они первоначально установлены, и оснащать новейшими средствами только новые объекты. Поэтому в современном промышленном производстве наряду с новейшими средствами в эксплуатации находятся иногда и относительно старые устройства автоматизации.

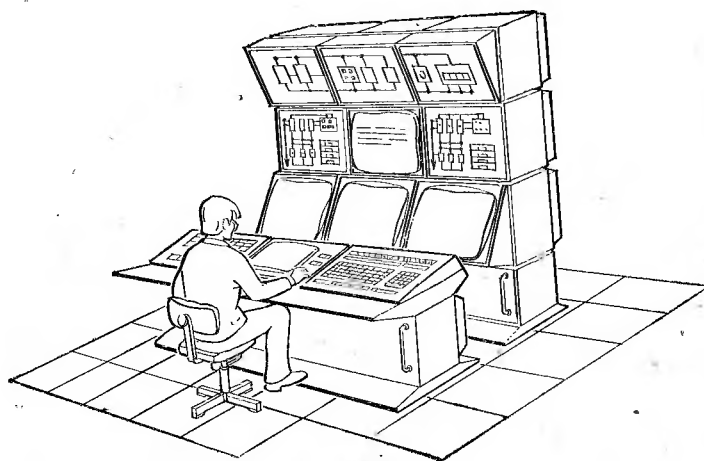


Рис. В.5. Пульт управления с использованием дисплейных модулей.

Для того чтобы определять степень морального износа средств автоматизации, вводится по аналогии с вычислительными машинами классификация технических средств по поколениям. Так, например, к первому поколению электрических средств автоматизации будем относить все средства, базирующиеся на использовании электронно-вакуумной техники. Ко второму поколению отнесем все устройства и системы, выполненные на базе транзисторной техники, а устройства, базирующиеся на использовании интегральных схем, будем относить к третьему поколению. Наконец, к четвертому поколению отнесем типы средств, построенные с использованием микропроцессорной техники, открывающей новые перспективы все более широкого использования управля-

ющих вычислительных систем, автоматических манипуляторов и роботов.

Книга, предлагаемая вниманию читателя, содержит систематизированное описание типичных комплексов технических средств автоматизации технологических процессов, относящихся ко второму и третьему поколениям. В соответствии с этим в первых двух главах рассматриваются общие принципы организации и построения средств автоматизации, автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и автоматических систем регулирования (АСР). Рассматриваются вопросы стандартизации и технические требования к средствам автоматизации, описываются обобщенные структуры АСУ ТП, принципы и особенности построения типовых алгоритмов регулирования на базе электрических, пневматических и гидравлических средств автоматизации.

В третьей и четвертой главах рассматриваются электрические средства автоматизации, приводятся обзор принципов и анализ особенностей построения электрических средств, рассматриваются принципы действия и схемы типовых исполнительных механизмов, описываются принципы действия и схемы основных блоков в комплексах средств «Каскад» и АКЭСР.

В пятой главе проводится обзор принципов и особенностей построения пневматических средств автоматизации, рассматриваются принципы построения унифицированной системы элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) и описываются функциональный состав и схемы средств автоматизации на базе УСЭППА. Здесь же кратко освещаются вопросы построения гидравлических средств регулирования.

Наконец, в последней, шестой главе рассматриваются вопросы построения управляющих вычислительных комплексов (УВК) на базе современных средств вычислительной техники.

В целом, рассматриваемые средства составляют техническую основу автоматизированных систем управления технологическими процессами на тепловых и атомных электростанциях и широко используются при автоматизации в других отраслях промышленности.

## Глава первая

### СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

#### 1.1. Методы стандартизации и структура технических средств автоматизации

Экономика отрасли, производящей средства автоматизации, требует широкой специализации предприятий по изготовлению крупных серий однотипных устройств. В то же время с развитием автоматизации, с появлением новых, все более сложных объектов управления и увеличением объема автоматизируемых функций возрастают требования к функциональному разнообразию устройств автоматизации и к разнообразию их технических характеристик и конструктивных особенностей исполнения. Задача уменьшения функционального и конструктивного многообразия при оптимальном удовлетворении запросов автоматизируемых предприятий решается при помощи методов стандартизации.

Решениям по стандартизации всегда предшествуют системные исследования практики автоматизации, типизация имеющихся решений и научное обоснование экономически оптимальных вариантов и возможностей дальнейшего сокращения многообразия применяемых устройств. Принимаемые при этом решения после их практической проверки оформляются обязательными к исполнению государственными стандартами (ГОСТ). Более узкие по сфере применения решения могут оформляться и в виде отраслевых стандартов (ОСТ), а также в виде имеющих еще более ограниченную применимость стандартов предприятий (СТП).

#### *Агрегатирование и блочно-модульный принцип*

Агрегатирование — принцип формирования состава серийно изготавливаемых средств автоматизации, направленный на максимальное удовлетворение запро-

сов предприятий-потребителей при ограниченной номенклатуре серийно выпускаемой продукции.

Агрегатирование базируется на том, что сложные функции управления можно разложить на простейшие составляющие (также, как, например, сложные вычислительные алгоритмы можно представить в виде совокупности отдельных простейших операторов). Другими словами, агрегатирование основывается на разложении общей задачи управления на ряд простейших однотипных операций, повторяющихся в тех или иных комбинациях в самых различных системах управления. При анализе большого количества подобных систем управления можно выделить ограниченный набор простейших функциональных операторов, на комбинации которых строится практически любой вариант АСУ. Таким образом и формируется состав серийно изготавливаемых средств автоматизации, который включает такие конструктивно завершённые и функционально самостоятельные единицы, как блоки и модули, приборы и механизмы.

Блок — конструктивное сборное устройство, выполняющее одну или несколько функциональных операций по преобразованию информации.

Модуль — унифицированный узел, выполняющий элементарную типовую операцию в составе блока или прибора.

Механизм исполнительный — устройство для преобразования управляющей информации в механическое перемещение с располагаемой мощностью, достаточной для воздействия на объект управления.

В соответствии с принципом агрегатирования системы управления создаются путем монтажа модулей, блоков, приборов и механизмов с последующей коммутацией каналов и линий связи между ними. В свою очередь, сами блоки и приборы создаются также путем монтажа и коммутации различных модулей. Модули же собираются из более простых узлов (микромодулей, микросхем, плат, устройств коммутации и т. п.), составляющих элементную базу технических средств. При этом изготовление блоков, приборов и модулей осуществляется полностью в заводских условиях, в то время как монтаж и коммутация АСУ полностью завершаются лишь на месте их эксплуатации. Такой подход к построению блоков и приборов получил название блочно-модульного принципа исполнения технических средств автоматизации.

Применение блочно-модульного принципа не только позволяет проводить широкую специализацию и коопе-



пирование предприятий в рамках отрасли, производящей средства автоматизации, но и ведет к повышению ремонтпригодности и увеличению коэффициентов использования этих средств в системах управления. Обычно предприятия, выпускающие средства автоматизации промышленного назначения, специализируются на изготовлении комплексов или систем блоков и приборов, функциональный состав которых ориентирован на реализацию каких-либо крупных функций или подсистем АСУ. При этом в рамках отдельного комплекса все блоки и приборы выполняются совместимыми по интерфейсу, т. е. совместимыми по параметрам и характеристикам сигналов-носителей информации, равно как и по конструктивным параметрам и характеристикам устройств коммутации. Принято называть такие комплексы и системы средств автоматизации агрегатными или агрегированными.

В Советском Союзе производство средств автоматизации промышленного назначения осуществляется в основном на предприятиях Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР в рамках Государственной системы приборов и средств автоматизации промышленного назначения (или сокращенно ГСП).

Государственная система приборов включает все средства автоматизации, отвечающие единым общим техническим требованиям к параметрам и характеристикам сигналов-носителей информации, к характеристикам точности и надежности средств, к их параметрам и особенностям конструктивного исполнения. Система наиболее важных исходных требований к сигналам-носителям информации сформулирована ГОСТ 12997-76 «ГСП. Общие технические требования». В этом же стандарте указывается на предпочтительность изготовления средств автоматизации в рамках требований ГСП и предпочтительность блочно-модульного принципа их исполнения.

### *Унификация средств автоматизации*

Унификация — сопутствующий агрегатированию метод стандартизации, также направленный на упорядочение и разумное сокращение состава серийно изготавливаемых средств автоматизации. Унификация направлена на ограничение многообразия параметров и технических характеристик, принципов действия и схем, а также кон-

структивных особенностей исполнения средств автоматизации. В области унификации средств автоматизации особое значение имеет упоминавшийся ГОСТ 12997-76, а также ряд других стандартов, дополняющих и развивающих его положения.

Сигналы-носители информации в средствах автоматизации могут различаться как по физической природе и параметрам, так и по форме представления информации. В рамках ГСП применяются в серийном производстве средств автоматизации следующие типы сигналов-носителей информации:

электрический сигнал (напряжение, сила или частота электрического тока);

пневматический сигнал (гидростатическое давление сжатого воздуха);

гидравлический сигнал (гидростатическое давление или перепад давлений жидкости).

Соответственно в рамках ГСП формируются электрическая, пневматическая и гидравлическая ветви средств автоматизации.

Наиболее развитой ветвью средств автоматизации является электрическая. В то же время широко используются и пневматические средства. Развитие пневматической ветви ограничивается относительно высокой скоростью преобразования и передачи пневматических сигналов. Тем не менее в области автоматизации пожаро- и взрывоопасных производств пневматические средства находятся, по существу, вне конкуренции. Гидравлическая ветвь средств ГСП не получила широкого развития.

По форме представления информации сигнал может быть аналоговым, импульсным и кодовым.

Аналоговый сигнал характеризуется текущими изменениями какого-либо физического параметра носителя (например, мгновенными значениями электрического напряжения или тока). Такой сигнал существует практически в каждый данный момент времени и может принимать любые значения в пределах заданного диапазона изменений параметра.

Импульсный сигнал характерен представлением информации только в дискретные моменты времени (т. е. характерен наличием квантования по времени). При этом информация представляется либо в виде изменений физического параметра носителя, либо параметрами и периодом повторения импульсов (при постоянных значениях физических параметров носителя).

Кодовый сигнал представляет собой сложные последовательности импульсов, используемые для пере-



дaчи цифровой информации. При этом каждая цифра может быть представлена в виде сложной последовательности импульсов (т. е. в виде кода), а передаваемый сигнал является дискретным и по времени, и по уровню.

В соответствии с формой представления информации средства ГСП делятся на аналоговые и дискретно-цифровые. К последним относятся также и средства вычислительной техники.

Все параметры и характеристики сигналов-носителей информации в средствах ГСП унифицированы. Так, стандартами предусматривается использование в аналоговых средствах следующих видов электрических сигналов:

сигнал по изменению силы постоянного тока (токовый сигнал);

сигнал по изменению напряжения постоянного тока;

сигнал по изменению напряжения переменного тока; частотный электрический сигнал.

Сигналы постоянного тока используются чаще. При этом токовый сигнал (с большим эквивалентным внутренним сопротивлением источника) применяется для передачи информации в относительно длинных линиях связи.

Сигналы переменного тока редко используются для преобразования и передачи информации во внешних линиях связи. Это связано с тем, что при сложении и вычитании сигналов переменного тока необходимо выполнять требование синфазности, а также обеспечивать подавление нелинейных искажений гармоник тока. В то же время при использовании этого сигнала легко реализуются задачи гальванического разделения электрических цепей.

Электрический частотный сигнал является потенциально наиболее помехоустойчивым аналоговым сигналом. В то же время получение и осуществление линейных преобразований этого сигнала вызывает известные затруднения. Поэтому частотный сигнал также не получил широкого распространения.

Для каждого вида электрического аналогового сигнала установлен ряд унифицированных диапазонов изменений физических параметров носителей информации. Так, для токового сигнала установлены диапазоны: (ГОСТ 9895-78) 0—5 мА, или  $-5 \div 0 \div +5$  мА; 0—20 мА; 4—20 мА и 0—100 мА (причем диапазон 0—5 мА является предпочтительным). Для сигналов напряжения постоянного тока установлены диапазоны: 0—10 В, или  $-10 \div 0 \div +10$  В, а также 0—24 В; 0—48 В; 0—110 В; 0—220 В. Для сигналов переменного тока установлены диапазоны: 0—1 В; 0—2 В, 0—220 В (предпочтительные) и 0—36 В; 0—127 В; 0—380 В (допускаемые, но не рекомендуемые).

ГОСТ 10938-75, ГОСТ 12814-74 и ГОСТ 14853-76 устанавливают также ряды диапазонов изменений параметров для частотных и кодовых сигналов.

Для пневматического сигнала установлен (ГОСТ 13053-76) диапазон 0,02—0,1 МПа, а для гидравлического сигнала диапазоны: 0,01—0,1 МПа; 0,025—0,25 МПа; 0,05—0,5 МПа.

ГОСТ на типы и параметры сигналов-носителей информации унифицирует систему внешних связей или интерфейс средств автоматизации. Такая унификация, дополненная стандартами на устройства коммутации блоков друг с другом (в виде системы разъемов), создает предпосылки для максимального упрощения проектирования, монтажа, коммутации и наладки технических средств в АСУ. При этом блоки, приборы и прочие устройства с одинаковым типом и диапазоном параметров на входах-выходах стыкуются путем простого соединения разъемов.

В рамках агрегатированных средств автоматизации для внутренней связи (между блоками данного комплекса) обычно используется только один тип сигнала с одним диапазоном изменений параметров, но в состав комплекса включаются устройства преобразования для ввода-вывода внешних сигналов с другими типами носителей или диапазонами параметров. Естественно, при разработке комплексов, ориентированных на применение в определенной отрасли, учитываются лишь общепринятые для данной отрасли варианты сигналов.

Хорошо подобранный функциональный состав агрегатированных комплексов существенно упрощает проектирование технического обеспечения подсистем АСУ, а тщательно продуманная система соединений резко снижает объем работ по коммутации блоков. Выполнение требований ГОСТ 12997-76 по взаимозаменяемости блоков и модулей (без дополнительной подстройки) облегчает наладку и ремонт.

## **1.2. Основные требования к техническим характеристикам средств автоматизации**

### *Требования к составу средств автоматизации*

Управление промышленными процессами, установками и производствами имеет своей целью достижение максимальной экономической эффективности при задан-

ной планом выработке продукции. Но возможности управления в повышении экономичности не безграничны; каждый реальный процесс, установка, технология и производство имеют предел эффективности управления. Предел для объектов с реальными источниками и средствами получения информации, но с оптимальными (т. е. найденными из условия максимума эффективности) алгоритмами управления может рассматриваться как мера потенциальной эффективности системы управления. Иначе говоря, потенциальная эффективность есть

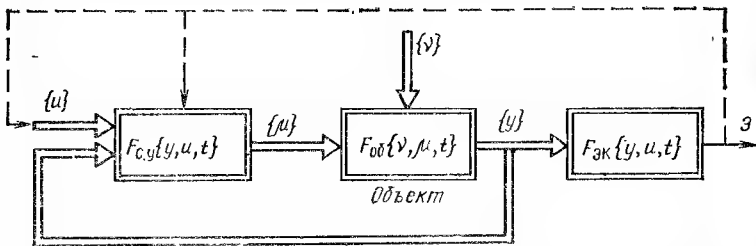


Рис. 1.1. Обобщенная математическая структура системы управления.  $\{y_i\}$  — выходные параметры объекта управления;  $\{u\}$  — регулирующие или управляющие воздействия;  $\{v\}$  — возмущающие воздействия;  $\{u_i\}$  — программы заданного (желаемого) состояния объекта.

тот предел, выше которого за счет оптимизации управления (но без изменения количества источников информации или схем, а также параметров и конструкции технологических установок и средств измерения) подняться невозможно.

Для подсистемы управления вида, рассмотренного на рис. 1.1, оптимальный алгоритм управления может быть задан формализованными операторами преобразования информации о параметрах состояния объекта  $\{y_i\}$  и априорной информации о его желаемом состоянии  $\{u_i\}$  в регулирующие воздействия  $\{u_i\}$ . Представим такой алгоритм следующим обобщенным оператором:

$$\{u_i\} = F_{c.y}^{\text{опт}} \{y_i, u_i, t\}. \quad (1.1)$$

В качестве простейшего частного примера такого алгоритма приведем уравнение ПИ-алгоритма регулирования

$$u = K_p(u - y) + \frac{K_p}{T_n} \int_0^t (u - y) dt.$$

Для поиска оптимальных алгоритмов (1.1) необходимо располагать априорной информацией об алгоритмах функционирования объекта (т. е. знать его математическую модель):

$$\{y_i\} = F_{об} \{u_i, v_i, t\},$$

а также информацией о целевой функции и о характеристиках возмущений  $\{v_i\}$ . Целевая функция (точнее, целевой функционал) должна описывать связь параметров состояния объекта  $\{y_i\}$ , а также ряда параметров и характеристик системы управления  $\{u_i\}$  с прямым экономическим эффектом:

$$Z = F_{эк} \{y_i, u_i, t\},$$

или с системой заменяющих его частных технико-экономических показателей и определяющих их характеристик. Известна, например, методика определения оптимальных алгоритмов регулирования с использованием в качестве целевой функции дисперсии регулируемого параметра. Последняя является в ряде случаев характеристикой, определяющей такие технико-экономические показатели, как надежность объекта, его коэффициент полезного действия и т. п.

Выбираемые при проектировании алгоритмы управления отличаются от идеально оптимальных, а реальные рабочие алгоритмы часто отличаются от проектных. Эти несоответствия ведут к снижению реальной эффективности управления и, следовательно, к экономическим потерям.

Отличие проектных алгоритмов управления от оптимальных может быть вызвано их вынужденным упрощением при недостаточно полном функциональном составе серийно изготавливаемых технических средств. Поэтому правильному формированию функционального состава и номенклатуры серийно изготавливаемых технических средств, выработке обоснованных требований к такому составу и его непрерывному обновлению и пополнению следует уделять должное внимание.

Современный состав технических средств автоматизации формируется на базе изучения спроса потребителей, с учетом реальных возможностей заводов-изготовителей и с широким научным обобщением опыта проектирования и эксплуатации автоматизированных систем управления. Формальное содержание состава серийно изготавливаемых средств отражается в производственных планах заводов-изготовителей и фиксируется в номенклатурных справочниках выпускаемой продукции.

В числе факторов, вызывающих отличие реальных алгоритмов управления от проектных и оптимальных, следует отметить погрешности реальных технических

средств, а также их надежность и степень сложности эксплуатации и обслуживания.

### Требования к точности реализации алгоритмов управления

Пусть задан идеальный проектный алгоритм управления  $F_{с.у}^{ид} \{u, t\}$ , отражающий, хотя бы в первом приближении, идеальный оптимальный алгоритм (1.1). Примем для упрощения  $u=0$ . Для технической реализации алгоритма надо подобрать или построить физическое устройство, преобразующее входную информацию  $\{y\}$  в выходную  $\{\mu\}$ , так, чтобы (рис. 1.2) в соответствии с заданным идеальным алгоритмом  $F_{с.у}^{ид}$  осуществить:

$$\mu(t) \rightarrow \mu_{ид}(t).$$

Эта задача может быть решена лишь с известной степенью приближенности (так как поведение реального

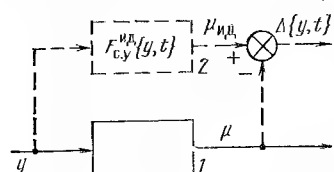


Рис. 1.2. Схема оценки погрешности алгоритма управления.

1 — реальное устройство; 2 — идеальный алгоритм.

идеального алгоритма  $\mu_{ид}$  и соответствующими значениями выхода реального устройства, т. е. абсолютная погрешность окажется достаточно малой:

$$\Delta\{y, t\} = \mu_{ид} - \mu \rightarrow 0. \quad (1.2)$$

Таким образом, всегда имеется зависящая от схемных, конструктивных и т. п. решений погрешность реализации требуемого идеального алгоритма. Эту погрешность можно классифицировать как инструментальную.

Отличие реального алгоритма от требуемого идеального может вести к снижению эффективности управления и, чтобы не нести из-за этого слишком больших потерь, необходимо как-то ограничивать инструментальную погрешность. Общепринятый и традиционный подход сводится к ограничению такой погрешности для

каждого прибора, блока и устройства, входящих в состав системы управления.

Обычно для упрощения принимают, что инструментальная погрешность каждого элемента может быть представлена в виде суммы двух составляющих

$$\Delta\{y, t\} = \Delta_{ст}(\bar{y}) + \Delta_{дин}\{y, t\},$$

где  $\Delta_{ст}$  — статическая погрешность (при постоянном входном  $\bar{y} = \text{const}$  и выходном  $\mu = \text{const}$  сигналах);  $\Delta_{дин}$  — динамическая погрешность (зависит от величины и характера изменения входного сигнала  $y$ ).

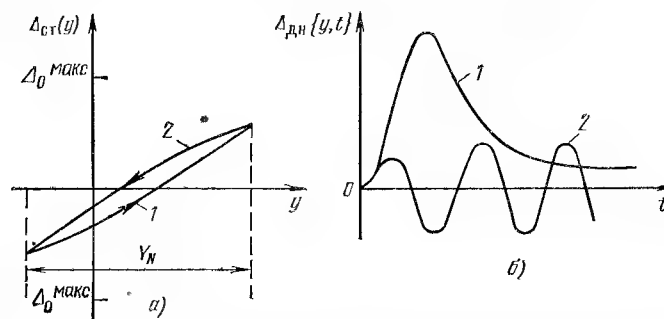


Рис. 1.3. Примеры графиков статической (а) и динамической (б) составляющих инструментальной погрешности.

а: 1 — при прямом ходе; 2 — при обратном ходе; б: 1 — при ступенчатом входном сигнале; 2 — при гармоническом входном сигнале.

Статическая погрешность, возникающая при нормальных условиях эксплуатации, называется основной. Эта погрешность может быть найдена расчетно-экспериментальным путем при сопоставлении по рис. 1.2 расчетных значений  $\mu_{ид}$  и экспериментальных установившихся значений реального выхода  $\mu$  при постоянном значении входа  $y = \bar{y}$  или может задаваться графиком (вида, показанного на рис. 1.3, а). Такой график может служить также и для оценки инструментальной погрешности при медленных и монотонных изменениях входного сигнала  $y(t)$ .

Динамическая погрешность  $\Delta_{дин}\{y, t\}$  проявляется при резких, частых и знакопеременных изменениях входа  $y$ . При заданном изменении входного сигнала  $y(t)$  эту погрешность можно также оценить сопоставлением по (1.2) расчетных  $\mu_{ид}$  и реальных  $\mu$  значений выходного сигнала. Полученный при этом график (вида, показанного на рис. 1.3, б) определяет погрешность  $\Delta_{дин}\{y, t\}$  лишь для данного изменения входа и не дает прямой информации о значениях динамической погрешности при другом характере изменения  $y$ .

Существующая система ограничений инструментальной погрешности зафиксирована в государственных стан-

дартах по нормированию погрешностей и базируется на следующих исходных положениях. Каждому типу средств автоматизации устанавливается класс точности — число  $K$ , выбираемое из нормированного ряда (в который входят, например, числа 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и т. д.). Это число определяет пределы допускаемых погрешностей для средств данного типа. Класс точности  $K$  непосредственно определяет предел основной допускаемой погрешности:

$$K = \delta_o^{\max} = \frac{\Delta_o^{\max}}{Y_N} 100\%, \quad (1.3)$$

где  $K$  — класс точности;  $\delta_o^{\max}$  — предел приведенной основной допускаемой погрешности;  $\Delta_o^{\max}$  — предел абсолютной основной допускаемой погрешности;  $Y_N$  — нормирующее значение приведенной погрешности (обычно равное диапазону изменения выходного сигнала).

Прочие составляющие инструментальной погрешности могут задаваться в долях от предела основной допускаемой погрешности.

Алгоритмы, значения классов точности, диапазоны изменения сигналов обычно приводятся в технической документации, прилагаемой к серийно изготовленным средствам. Отметим, что для систем управления промышленного назначения характерно использование технических средств автоматизации класса 0,5—1,5.

### *Требования к надежности технических средств автоматизации*

Нарушение работоспособности, т. е. отказ какого-либо устройства в системе управления, может вызвать резкое изменение алгоритма управления и переход к временной работе с неоптимальным алгоритмом, что в конечном счете ведет к значительным экономическим потерям. Эти потери многократно усиливаются, если новый алгоритм приводит объект к аварийному состоянию с последующим частичным снижением производительности, остановом оборудования и тому подобным последствиям.

Чтобы ограничить эти потери в общем балансе затрат на производство продукции, необходимо предъявить известные требования к способности системы управления выполнять заданные функции, т. е. требования

к ее надежности. Надежность системы в целом определяется надежностью технических средств, из которых она состоит.

Надежность — это комплексная характеристика, которая может определяться количественно такими показателями, как безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтопригодность (ГОСТ 13337-75). Наиболее важной для функционирования систем управления компонентой надежности является безотказность средств автоматизации.

В технической документации на средства автоматизации в большинстве случаев применяются такие показатели безотказности, как вероятность безотказной работы и средняя наработка до первого отказа.

Вероятность безотказной работы — это вероятность невозникновения отказа (т. е. вероятность непрерывной работы устройства) в пределах заданного промежутка времени. Так, вероятность безотказной работы устройства, равная 0,9 за 10 тыс. ч, означает, что в среднем 10% таких устройств могут выйти из строя за заданный промежуток времени, а в среднем 90% должны функционировать нормально.

Средняя наработка до первого отказа — это математическое ожидание наработки до первого отказа, т. е. оценка усредненного времени безотказной работы устройства.

Отметим вероятностный и, так сказать, необязательный для каждого отдельного устройства характер показателей надежности. Так, если средняя наработка устройства до отказа задана равной 10 тыс. ч, то это совсем не значит, что данное устройство не должно выйти из строя сразу же после включения в работу или же, скажем, после 10 ч работы. Однако при заданной наработке до отказа в 10 тыс. ч такие события должны быть по крайней мере маловероятны.

### *Требования простоты обслуживания систем управления*

Отказы в системах управления и переход к случайным неоптимальным алгоритмам могут быть вызваны и неправильными, ошибочными действиями персонала, эксплуатирующего или обслуживающего технические средства автоматизации. Техническое исполнение средств может либо содействовать возникновению таких ошибок, либо как-то блокировать их возможность, и это предполагает целесообразность постановки соответствующих требований к средствам автоматизации.

Для снижения вероятности ошибочных действий персонала (а по оценкам ряда экспертов с ними связано до 25% всех аварий на электростанциях) необходимо прежде всего обеспечить «взаимопонимание» человека и системы управления, конкретно обеспечить правильность и своевременность восприятия и оценки ситуаций и выдачи команд.

Существует ряд общих, направленных на обеспечение такого взаимопонимания рекомендаций по системе управления в целом (система требований к языку «общения» человека с системой, к формам представления информации оператору, к оформлению пультов, щитов и мнемосхем и т. п.). Имеется также и ряд частных рекомендаций к разработкам и техническому исполнению отдельных устройств. Отметим некоторые общепризнанные положения, такие как целесообразность автоматической сигнализации полного отказа устройства или нежелательность установки в одном устройстве более двух взаимосвязанных органов оперативной настройки.

Однако связанные с этим вопросы стандартизации и нормирования отработаны недостаточно, нет количественных технико-экономических показателей, аналогичных принятым в метрологии и в теории надежности.

Обслуживание технических средств автоматизации направлено на сохранение их в исправном состоянии, т. е. в конечном счете на повышение их надежности. Обслуживание предусматривает проведение регламентных профилактических ремонтов, обнаружение и устранение всяких ведущих к отказам неисправностей, замену или восстановление вышедших из строя средств, выполнение правил нормальной эксплуатации.

Требования к средствам автоматизации, направленные на ограничения сложности обслуживания, регламентируют абсолютную взаимозаменяемость серийно изготовленных средств (ГОСТ 12997-76) и определяют количественные показатели и требования к ремонтпригодности средств автоматизации (ГОСТ 13377-75).

Наряду с этими производными от экономики ограничениями к средствам автоматизации предъявляются также и эргономические (т. е. связанные с охраной здоровья и жизни людей) требования безопасности. В систему таких требований прежде всего входят ограничения на используемые в средствах энергетические потенциалы. Так, в измерительных цепях, в информационных каналах связи и в системах оперативного управления электрическое напряжение обычно не должно превышать 12 В, максимально допускаемое напряжение исполнительных устройств не должно превышать 380/220 В,

а давление сжатого воздуха в пневматических системах управления не должно превышать 0,6 МПа.

В числе прочих мер безопасности известны ограничения на применение в системах управления элементов с источниками радиоактивности, с отравляющими или вредными веществами (ртуть) и т. д. Целям безопасности служат также существующие ограничения на применение электрических средств автоматизации в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

#### *Системный характер требований к средствам автоматизации*

Требования к полноте функционального состава, к инструментальным погрешностям, к показателям надежности и, наконец, к уровням сложности эксплуатации и обслуживания определены стремлением ограничить экономические потери, которые могут иметь место при работе систем с неоптимальными алгоритмами управления. Эти требования в известной мере взаимосвязаны и противоречивы. Так, например, снижение инструментальных погрешностей усложнением схемных решений приводит, как правило, к снижению показателей надежности соответствующих устройств, к повышению их стоимости, усложнению эксплуатации или обслуживания. Следовательно, возникает задача оптимизации соотношений между различными требованиями к технико-экономическим характеристикам средств автоматизации (слишком точная реализация оптимального алгоритма — низкая надежность, высокая стоимость; менее точная реализация — систематические потери от работы с неоптимальным алгоритмом).

Обоснованное решение такой задачи может быть получено лишь при системном анализе, при совместном рассмотрении влияния всех технических характеристик средств автоматизации на экономическую эффективность системы управления, а также в результате поиска экстремума эффективности как функции этих характеристик.

### **1.3. Структура АСУ ТП и состав технических средств автоматизации**

#### *Обобщенная структура управляющих функций АСУ ТП*

Наиболее полные в функциональном отношении комплексы технических средств используются в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП). Это сложные системы, предназначенные для реализации экономически целесообразных алгоритмов управления технологическим процессом и обеспечивающие возможность активного участия в управлении человека-оператора.

АСУ технологическим процессом имеет единую конечную цель — обеспечение максимальной экономической эффективности процесса (например, при производстве запланированного количества продукции — обеспечения минимизации приведенных затрат).

Для достижения этой цели на технологическом объекте предусматривается (см. рис. 1.1) ряд управляющих или регулирующих входов-воздействий  $\{u\}$ . Значения этих входов могут варьироваться в известных пределах, и задача АСУ состоит в том, чтобы, исходя из поставленной конечной цели, устранять неопределенности состояний  $\{u\}$ . Другими словами, устройства АСУ должны для каждого текущего момента определять оптимальные значения входов  $\{u_{оп}(t)\}$ , обеспечивающие достижение максимума эффективности процесса. Для этого в системе управления осуществляются преобразования априорной и текущей информации о состояниях объекта и технологического процесса. Наилучший вариант решения такой задачи предполагает использование многоуровневой (иерархической) структуры преобразования информации в системе управления.

На низшем уровне простейшей двухуровневой системы (рис. 1.1) используется текущая измерительная информация  $\{y\}$  о параметрах состояния технологического объекта.

На базе этой информации в рамках контура обратной связи «параметры  $\{y\}$  → оператор  $F_{c,y}\{y_i, u_i, t\}$  → воздействия  $\{u\}$ » происходят определение и установка таких значений  $u$ , при которых изменения параметров  $y_i(t)$  соответствуют некоторым априорным программам  $u_i(t)$  их желаемого поведения.

Для построения и функционирования низшего уровня необходимо устранить неопределенность программ  $\{u\}$  и алгоритмов управления  $F_{c,y}\{y_i, u_i, t\}$ . В соответствии с конечной целью, выбрать их надо так, чтобы экстремизировать экономическую эффективность процесса. Эта задача решается на высших уровнях иерархии АСУ, причем какие-то исходные программы и алгоритмы могут определяться за пределами АСУ (на стадии проектирования объекта и системы управления). Тогда они реализуются в процессе создания и внедрения АСУ. При такой ситуации высшие уровни преобразования информации в АСУ ТП предназначаются лишь для дополнительной оптимизации программ и операторов низшего

уровня (при отклонении реальных условий и результатов работы АСУ от расчетных).

На рис. 1.1 высший уровень иерархии (показан пунктиром) представлен контуром обратной связи «параметры  $\{y\}$  → расчет показателя экономичности  $\mathcal{E}$  и его оптимизация → программы  $\{u\}$  и алгоритмы  $F_{c,y}\{y_i, u_i, t\}$ ». Как видим, высшие уровни АСУ также используют измерительную информацию. Однако эта информация в конечном счете необходима для формирования и функционирования математических моделей реальной ситуации, в том числе моделей экономических или технико-экономических показателей. В соответствии с содержанием последних (выработка продукции, КПД, коэффициенты готовности и использования, затраты, стоимость, себестоимость и т. д.) измерительная информация используется в опосредствованном виде, после фильтрации, осреднения и тому подобных преобразований.

Введение уровней иерархии на первый взгляд лишь осложняет проблему управления. В самом деле, если в исходной постановке для решения задачи управления требовалось отыскать  $n$ -функций  $u_i(t)$ , то теперь следует решить аналогичную задачу по отношению к  $n$ -функциям  $u_i(t)$  и определить  $n$ -мерный оператор  $F_{c,y}\{y_i, u_i, t\}$ . Однако увеличение сложности структуры компенсируется резким уменьшением критичности получаемой системы по отношению к случайным возмущениям  $v_j(t)$ , влияние которых при эффективной работе систем низшего уровня в известной мере исключается.

В простейшем случае программы оптимального функционирования объекта  $\{u\}$  могут задаваться: константами

$$u_i = y_i^{опт} = \text{const}$$

или функциями

$$u_i = y_i^{опт}(t), \quad (1.4)$$

неравенствами вида

$$u_j > y_j(t), \quad (1.5)$$

а также неравенствами вида

$$u_{k1} > y_k(t) > u_{k2}. \quad (1.6)$$

Программы  $\{u\}$  могут задаваться и в условном виде с помощью функций или операторов вида

$$u_i(t) = F\{u_j, y_k\} \quad (1.7)$$

или  $u_i(t) > F\{y_j, y_k\}$ .

Кроме того, часто имеет место совмещение условий вида (1.4), (1.5) или (1.7), (1.5) и т. п.



Случай (1.4) предполагает наличие заметного экстремума во взаимосвязи показателя эффективности с параметром  $y_i$ . Для выполнения программы такого типа на нижнем уровне иерархии используется (рис. 1.4) автоматическое регулирование (АР). В процессе регулирования параметра  $y_i$  один из входов  $\mu_i$  (регулирующее воздействие) должен меняться так, чтобы рассогласование  $\varepsilon_i$  между текущими значениями  $y_i$  и  $u_i$  устранялось и

$$\varepsilon_i = u_i - y_i \rightarrow 0. \quad (1.8)$$

При этом регулирующее воздействие  $\mu_i$  меняется в пределах некоторого диапазона (диапазон регулирования).

Программы вида (1.5), (1.6) предполагают независимость показателя эффективности от значений параметров  $\{y\}$  в некотором диапазоне их изменений, т. е. при выполнении (1.5), (1.6), и заметное снижение экономической эффективности при нарушении неравенств (1.5), (1.6). Для реализации программ такого типа на нижнем уровне иерархии АСУ ТП используется (рис. 1.4) логическое управление (ЛУ).

Здесь при наличии рассогласования реального поведения параметра  $y_i$  с предписанным ему программой вида (1.5), (1.6) оптимальным происходит лишь дискретное изменение состояний ряда воздействий  $\{\mu\}$ . При этом каждое такое воздействие непосредственно управляется устройством, реализующим логическую операцию ИЛИ, и может поэтому находиться только в одном из двух возможных состояний. Взаимосвязь между множеством различных

воздействий  $\{\mu\}$  с одним или несколькими параметрами  $y_i$ , а также условные взаимосвязи вида (1.7) приводят к необходимости построения сложных систем логического управления. Однако все они строятся на базе комбинаций простейших логических функций (ИЛИ, И, НЕ и т. п.).

Таким образом, обобщенная структура управления включает функции (рис. 1.4) автоматического регулирования и логического управления на нижнем и оптимизации управляющих программ и алгоритмов на высшем уровнях иерархии. Принято называть такие функции АСУ ТП управляющими.

Наряду с этим в составе управляющих функций часто упоминают и такие, как технологические защиты, дискретное управление, резервирование. В рамках принятых определений эти функции носят частный характер и входят в состав логического управления. Так, защита фактически реализует логические операции по локализации нарушения режимов технологического объекта управления и блокировки развития возникающих при этом аварийных ситуаций. Дискретное управление задвижками и ключами при включении резервных устройств для восстановления утраченных функций также осуществляется с помощью логических операций.

Автоматическое регулирование осуществляется по известным типовым алгоритмам, и реализация этой функции АСУ ТП обычно не вызывает затруднений принципиального характера. Функции логического управления и оптимизации, напротив, имеют в общем случае нетиповой характер. Для их автоматизации требуется большой объем априорных формализованных сведений о протекающих процессах и их взаимосвязях и соотношениях с экономической эффективностью. Если все эти процессы и взаимосвязи изучены слабо, то записать сколько-нибудь обоснованные алгоритмы логического управления и соответственно автоматизировать их выполнение не представляется возможным.

Тогда эти управляющие функции выполняет человек-оператор. Кроме того, он же выполняет ряд функций, автоматизация которых просто нецелесообразна по экономическим соображениям, как например автоматизация редко используемых функций переключения вспомогательных исполнительных устройств в процессах подготовки к операциям пуска-останова оборудования. При

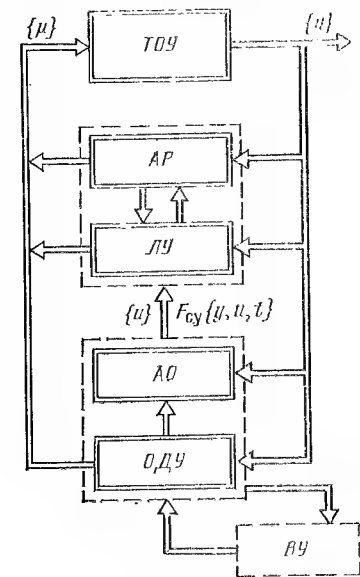


Рис. 1.4. Структура управляющих функций АСУ ТП.

ТОУ — технологический объект управления; АР — автоматическое регулирование; ЛУ — логическое управление; АО — автоматическая оптимизация; ОДУ — оперативно-диспетчерское управление; ВУ — высшие уровни АСУ.

этом работу оператора в АСУ обеспечивает подсистема оперативно-диспетчерского управления (ОДУ). В рамках этой подсистемы оператор не только восполняет отсутствие ряда автоматических функций по управлению технологическим процессом, но, сверх того, осуществляет контроль работы и диагностику состояний автоматических средств, а также обеспечивает резервирование выполняемых ими функций при отказах.

Таким образом, реализация иерархической структуры управления (см. рис. 1.1) частично возлагается на оператора, выполняющего часть функций автоматического регулирования, логического управления и осуществляющего некоторые программы оптимизации. Кроме того, опытный оператор может справляться и с такими сложными для автоматических систем задачами, как диагностика или распознавание предаварийных ситуаций, выявление предполагаемых причин аварий и принятие решений в неопределенных ситуациях.

Однако человек плохо справляется с большими потоками разнородной информации (число контролируемых параметров такого объекта, как энергоблок имеет порядок  $10^4$ ). Многократное выполнение сложных вычислений в темпе с процессом (расчеты всевозможных комплексных показателей, в том числе экономических или технико-экономических, определение средних значений, определение выработки продукции за большой промежуток времени и т. п.) также лежит за пределами психофизиологических возможностей человека.

Поэтому предварительная обработка информации, ее упорядочение, выделение существенной для управления информацией входят также в функции АСУ. Эти функции АСУ принято называть информационными. Конкретно к информационным функциям АСУ ТП можно отнести:

систематический автоматизированный контроль параметров объекта  $\{y\}$  и сигнализацию отклонений  $\{y\}$  от заданных значений  $\{u\}$ ;

вычисление комплексных (в том числе технико-экономических и экономических) показателей функционирования объекта;

диагностирование состояний технологического оборудования и средств АСУ;

вывод данных на устройства отображения информации;

запоминание, хранение и вывод на регистрацию информации, полезной для корректировки будущих действий оператора, а также отчетной информации.

### Принципы технической реализации АСУ ТП и структура средств автоматизации

Для реализации структуры (рис. 1.4) следует построить ряд управляющих контуров «параметры  $\{y\}$  → операторы преобразования информации  $F_{c,y}\{y, u, t\}$  → воздействия на объект  $\{u\}$ ». При этом в каждом управляющем контуре низшего уровня АСУ ТП можно выделить (рис. 1.5):

средства получения информации (для получения текущей информации о параметрах  $\{y\}$  в виде сигнала, изменения которого отображают реальные изменения параметров объекта с достаточной точностью);

средства преобразования информации (для преобразования текущей и априорной информации в управляющие сигналы-команды в соответствии с оператором  $F_{c,y}\{y, u, t\}$ );

исполнительные устройства (для преобразования управляющих сигналов-команд в достаточно мощные энергетические воздействия  $\{u\}$ , т. е. для исполнения команд).

Для построения высших уровней АСУ необходима реализация управляющих контуров «параметры  $\{y\}$  → модели технико-экономических показателей → операторы оптимизации → программы  $\{u\}$  и алгоритмы  $F_{c,y}\{y, u, t\}$ ». Так как выходные сигналы высших уровней АСУ носят чисто информационный характер, то исполнительные устройства здесь, как правило, отсутствуют. Для реализации высших уровней АСУ необходимы средства преобразования информации, а также средства хранения информации. Необходимость последних

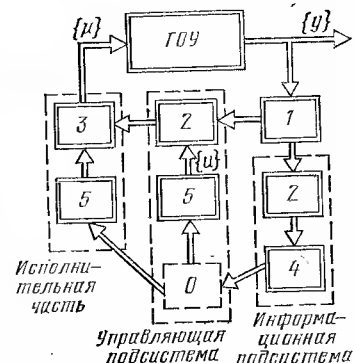


Рис. 1.5. Обобщенная структура технических средств АСУ ТП.

1 — средства получения информации; 2 — средства преобразования информации; 3 — исполнительные устройства; 4 — средства отображения информации; 5 — средства ввода информации; 0 — оператор.

связана со спецификой работы высших уровней иерархии АСУ, требующей накопления и осреднения информации, необходимой для выбора оптимальных программ и алгоритмов управления низшего уровня.

Наконец, как для высших, так и для низших уровней АСУ необходимы средства передачи информации или средства связи. На низшем уровне АСУ ТП можно ограничиться пассивными кабельными линиями связи с передачей сигналов без каких-либо промежуточных преобразований. В таком случае каждый сигнал должен иметь свой отдельный канал связи. Но при этом стоимость системы кабельных соединений даже для низшего уровня АСУ получается довольно внушительной. Поэтому на высших уровнях АСУ используются более сложные системы связи с применением средств телемеханики и вычислительной техники для упорядочения, редуцирования, сжатия и скоростной передачи больших потоков информации по минимальному числу каналов связи.

Перечисленные типы средств обеспечивают реализацию автоматической части АСУ ТП. Аналогичные средства необходимы и для построения подсистем оперативно-диспетчерского управления. Но для включения в управляющий контур АСУ человека-оператора требуются средства отображения информации (показывающие приборы, индикаторы, табло, мнемосхемы, дисплеи и т. п.), а также средства ввода информации (ключи, кнопки, клавиши и т. п.).

Средства получения информации, средства преобразования и хранения информации и исполнительные устройства существенно различаются как по назначению и принципам действия, так и по уровням используемых энергетических потенциалов и условиям эксплуатации и другим предъявляемым требованиям. Поэтому будем выделять средства получения информации в измерительную часть АСУ, средства преобразования, хранения и отображения — в информационно-управляющую часть АСУ (с дополнительным выделением в рамках этой части информационной и управляющей подсистем). Соответственно исполнительные устройства отнесем к исполнительной части АСУ.

*Характеристика средств измерительной, исполнительной и информационно-управляющей части АСУ ТП*

Входящие в состав измерительной части АСУ ТП первичные измерительные преобразователи (в частно-

сти, датчики) предназначены для выдачи сигнала-носителя информации, пропорционального изменениям выходных параметров объекта. При этом оптимальным алгоритмом преобразования информации или основным уравнением измерения обычно является линейная функция

Основное требование к средствам измерительной части АСУ ТП — это обеспечение необходимой точности измерений. Невыполнение этого требования рассматривается как фактический отказ средств.

Выходной сигнал первичных преобразователей является в подавляющем большинстве случаев аналоговым. При этом тип энергии носителя сигнала, как правило, тот же, что и в информационно-управляющей и исполнительной частях АСУ ТП (это избавляет от необходимости введения вторичных измерительных преобразователей для согласования различных типов сигналов).

Первичные измерительные преобразователи располагаются обычно вблизи точек измерения параметров, т. е. рассредоточены по контролируемому объекту и часто работают в неблагоприятных условиях при высоких температурах, влажности, уровне вибраций, в магнитных полях и т. п.

В состав исполнительной части АСУ ТП входят устройства, влияющие на ход физических процессов в объекте управления (путем воздействия на запорные и регулирующие органы — клапаны, шиберы, задвижки, вентили и т. п.). К их числу будем относить исполнительные механизмы (т. е. устройства для привода запорной и регулирующей арматуры) и усилители мощности сигналов-команд, поступающих из информационно-управляющей части АСУ.

По типу энергии, используемой для привода, исполнительные механизмы можно разделить на электрические, пневматические и гидравлические. Усилители мощности исполнительных устройств управляют подводом энергии к приводу исполнительного механизма в соответствии с управляющими сигналами-командами. Усилители мощности также бывают электрическими, пневматическими и гидравлическими. Но могут быть и комбинированные усилители (например, электрогидравлический для управления гидравлическим приводом при электрических управляющих сигналах). Назначение электрических усилителей мощности обычно сводится

к включению и отключению двигателя исполнительного механизма в соответствии с поступающими командами. В таком случае эти усилители называются пусковыми устройствами.

Основное требование к устройствам исполнительной части АСУ ТП — это надежность исполнения управляющих сигналов-команд. Для выполнения этого требования исполнительные механизмы и усилители должны прежде всего развивать достаточную мощность. Вторым условием надежного исполнения команд является безотказность самих исполнительных устройств и прежде всего исполнительных механизмов, располагаемых вблизи запорно-регулирующих органов и потому часто работающих в тяжелых условиях.

Средства информационно-управляющей части для низшего уровня АСУ ТП могут быть электрическими, пневматическими и (редко) гидравлическими, могут быть аналоговыми и дискретно-цифровыми (последние в основном электрические). На высших уровнях АСУ применяются главным образом электрические средства вычислительной техники.

Основное требование к информационно-управляющей части АСУ — реализация заданных алгоритмов преобразования информации с требуемой точностью. Причем алгоритмы преобразования информации в управляющей подсистеме АСУ ТП выбираются таким образом, чтобы обеспечить реализацию заданного проектного оператора  $F_{с.у}\{y, u, t\}$  для всего управляющего контура в целом. Таким образом, алгоритмы преобразования информации в управляющей части зависят не только от свойств и особенностей объекта управления, но и от реальных свойств и особенностей измерительных преобразователей и исполнительных устройств.

Устройства информационно-управляющей части АСУ ТП обычно сосредотачиваются в некотором удалении от технологического объекта, в помещениях с условиями, близкими к нормальным условиям эксплуатации.

### Области применения ветвей средств для автоматизации теплоэнергетических процессов

Электрическая энергия является наиболее доступным, гибким и удобным видом энергии для выполнения механических работ. Поэтому электрические исполнительные устройства (рис. 1.6) находят в схемах

управления технологическими процессами самое широкое применение. В частности, электрические исполнительные механизмы широко используются при автоматизации котлоаппаратных и реакторных цехов на тепловых и атомных электростанциях. В то же время электрический привод имеет и существенные недостатки, в силу которых его применение на ряде производств может быть резко ограничено или даже исключено. Так, надежность работы электродвигателя заметно снижает-

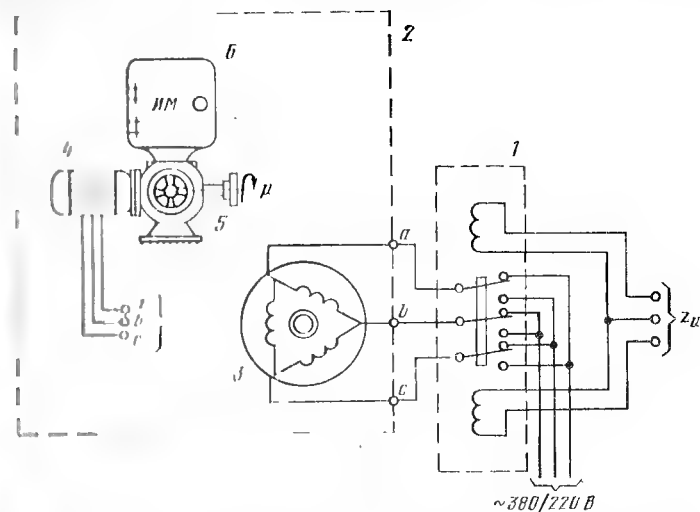


Рис. 1.6 Принципиальная схема электрического исполнительного механизма (ИМ) с релейным управлением.

1 — пусковое устройство; 2 — исполнительный механизм (ИМ); 3 — обмотки статора; 4 — электродвигатель; 5 — редуктор со штурвалом ручного управления; 6 — коробка с концевыми выключателями и датчиком положения ИМ.

ся при использовании его в условиях горячих цехов или цехов с повышенной влажностью, а также при повышенном уровне вибраций. На базе электродвигателя трудно построить компактный исполнительный механизм большой мощности. И, наконец, дешевые электродвигатели общепромышленного назначения нельзя применять на взрыво- и пожароопасных участках производства.

Информационно-управляющая часть АСУ ТП с электрическими исполнительными устройствами обычно строится на базе электрической ветви средств автоматизации. Последние, в сравнении со средствами пнев-

матической и гидравлической ветвей, обладают рядом преимуществ, к числу которых можно отнести:

относительную простоту и низкую стоимость изготовления средств преобразования информации (в условиях высокоразвитой электротехнической промышленности); удобство монтажа, наладки и эксплуатации (простота ремонтов, высокая надежность пассивных линий связи, тривиальность соединений при коммутации схем, простота подключения измерительных устройств при контроле исправности);

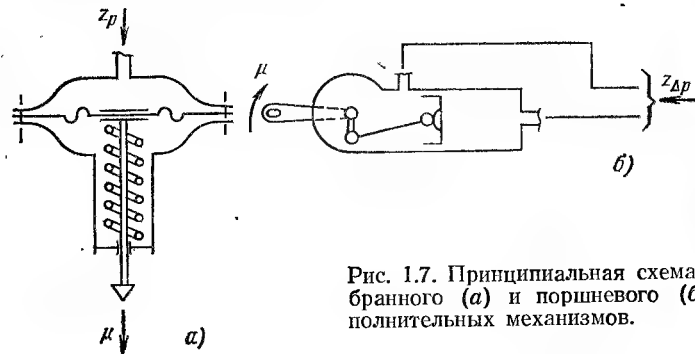


Рис. 1.7. Принципиальная схема мембранного (а) и поршневого (б) исполнительных механизмов.

отсутствие ограничений в пространственном расположении устройств, причем информационно-управляющая часть АСУ может быть удалена от объекта на значительные расстояния;

высокую скорость передачи и преобразования информации.

Исполнительная часть АСУ ТП в пожаро- и взрывоопасных цехах химических производств, как и на ряде металлургических производств строится на базе пневматических исполнительных механизмов. Пневматические мембранные исполнительные механизмы (рис. 1.7, а) являются простейшими серводвигателями, применяемыми для привода запорных и регулирующих органов. Это определяет высокую надежность и относительно невысокую стоимость пневматической исполнительской части АСУ ТП. Пневматические исполнительные механизмы могут надежно работать в цехах с повышенной влажностью, в химических цехах электростанций. Находят применение и пневматические поршневые исполнительные механизмы.

Информационно-управляющая часть АСУ ТП с пневматическими исполнительными устройствами выполняется обычно также на пневматических средствах, но только на низшем уровне иерархии, т. е. в пределах функций автоматического регулирования и логического управления. Высшие уровни иерархии АСУ строятся все же, как правило, на электрических средствах.

Современные пневматические средства преобразования информации отличаются высокой пожаро- и взрывобезопасностью и имеют высокую степень надежности, но только при надежной и качественной работе источников питания, так как носитель информации — сжатый воздух должен быть сухим и чистым.

К числу недостатков пневматических средств можно отнести неудобства в наладке, связанные со сложностью оперативных измерений давления воздуха при проверке работоспособности, и необходимость применения специальных компрессорных установок питания с устройствами для очистки воздуха. Большим недостатком является также относительно малая скорость передачи и преобразования информации (ограничиваемая скоростью звука). Это является малосущественным для работы нижних уровней АСУ ТП, так как приводит лишь к ограничениям длины пассивных линий связи (не более 300 м). Для обработки больших потоков информации на высших уровнях АСУ целесообразно применять более быстродействующие электрические средства вычислительной техники.

Гидравлические исполнительные механизмы (рис. 1.7, б) позволяют наиболее надежно и просто реализовать преобразование управляющих сигналов-команд и перемещение регулирующих органов, осуществляемое с большой скоростью и мощностью, надежно работают в неблагоприятных условиях при высокой влажности, повышенных температурах, вибрации и т. п.

Эти качества гидравлических исполнительных механизмов и определяют области их преимущественного применения. Так, для привода регулирующих клапанов турбин на ТЭС и АЭС применяются исключительно гидравлические исполнительные механизмы.

Однако большинство недостатков пневматических средств свойственны и гидравлике. Кроме того, гидравлические системы требуют более тщательной герметизации.

зации линий связи и нуждаются в специальных емкостях для хранения рабочей среды (в качестве которой могут использоваться либо простая вода, либо специальные негорючие масла). Поэтому гидравлические исполнительные механизмы редко используются там, где могут нормально работать обычные электрические или пневматические исполнительные механизмы. Гидравлические средства регулирования используются лишь для реализации простейших функций автоматического регулирования и защиты и только в тех контурах управления, где используются и гидравлические исполнительные механизмы. Типично, например, использование гидравлических систем регулирования и защиты турбин на ТЭС и АЭС (хотя в данном случае речь идет о средствах автоматизации специального, а не общепромышленного назначения).

### Основные принципы построения информационно-управляющей части АСУ ТП

Информационно-управляющая часть АСУ ТП может быть выполнена как на аналоговых средствах, так и на дискретно-цифровых средствах вычислительной техники. В первом случае каждый канал передачи информации имеет свой индивидуальный набор средств, а техническая структура АСУ ТП строится по принципу локальных (т. е. отдельных, конструктивно независимых) схем управления. При этом общее число устройств автоматизации в АСУ ТП ТЭС, АЭС и других сложных производств может достигать внушительных значений (порядка  $10^3$ — $10^4$  единиц). Во втором случае все операции по преобразованию информации могут выполняться одной или двумя цифровыми ЭВМ (с поочередным обслуживанием различных каналов преобразования и передачи информации), и техническая структура АСУ ТП строится по принципу централизации схем управления.

К моменту появления программируемых средств вычислительной техники структура низшего уровня АСУ ТП основывалась на аналоговых средствах и строилась соответственно по принципу локальных схем. При этом функции высших уровней АСУ выполнял человек-оператор, и, таким образом, эти функции были реализованы по необходимости централизованно.

Наличие серийного производства специализированных информационно-управляющих ЭВМ позволяет,

в принципе, отказаться от локальных схем. Однако переход к столь крайним формам централизации нецелесообразен, так как резко снижает живучесть автоматизированного технологического комплекса в целом. Ведь отказ ЭВМ равносильен в таком случае полной потере управления объектом с последующим аварийным остановом технологического процесса. Очевидно, какой-то минимум информационных и управляющих функций должен сохраняться практически в любых ситуациях, и наиболее надежный и целесообразный путь решения этой задачи на современном этапе сводится к частичному сохранению принципа локализации при построении схем АСУ ТП.

Поэтому в настоящее время все наиболее ответственные управляющие контуры АСУ ТП, связанные с защитой объекта от аварий и их последствий, выполняются, как правило, локальными и на аналоговых средствах. Сохранены и локальные каналы получения, преобразования и отображения информации о главных параметрах состояния технологического объекта. Все остальные управляющие функции на низшем уровне АСУ ТП (т. е. большая часть логического управления и автоматическое регулирование), а также вспомогательные или второстепенные информационные каналы могут выполняться как локально, так и централизованно.

Высокая степень централизации на низшем уровне АСУ ТП ТЭС и АЭС может быть обеспечена лишь при наличии информационно-управляющих машин с относительно высоким быстродействием и достаточными объемами памяти. Относительно высокая стоимость и все еще недостаточная надежность таких машин, а также большие затраты на разработку их внешнего математического обеспечения ограничивают тенденции цент-

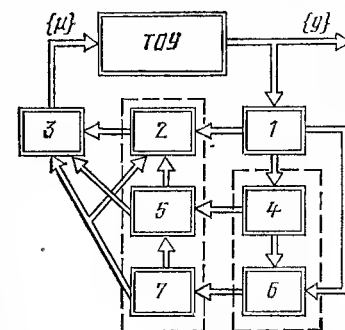


Рис. 1.8. Обобщенная техническая структура АСУ ТП с использованием ЭВМ.

1 — средства получения информации; 2 — локальные аналоговые средства преобразования информации; 3 — исполнительные устройства; 4 — информационный вычислительный комплекс; 5 — управляющий вычислительный комплекс; 6 — локальные и централизованные средства отображения информации; 7 — средства оперативного управления.



рализации управления на низшем уровне АСУ ТП. Поэтому считалось целесообразным строить все автоматические подсистемы управления и каналы информации по основным параметрам на локальных схемах с аналоговыми средствами (рис. 1.8). При этом на долю информационно-управляющих машин (класса мини-ЭВМ) фактически оставалось лишь информационное обеспечение оператора по вспомогательным и второстепенным параметрам, а также расчет комплексных технико-экономических показателей (таких, как КПД).

С появлением более дешевых микро-ЭВМ появились и новые возможности частичной централизации на низших уровнях управления. Все множество управляющих контуров и информационных каналов можно разделить на ряд функциональных групп, каждая из которых будет обеспечивать управление частью технологического объекта с относительно самостоятельной функциональной значимостью (например, управление турбиной, питательными насосами, главными циркуляционными насосами и т. д.). В пределах каждой такой группы все или большая часть функций преобразования информации могут выполняться на одной-двух микро-ЭВМ. При этом на долю локальных аналоговых средств можно по-прежнему оставить лишь особо важные контуры управления и по-прежнему следует сохранить мини- или микро-ЭВМ на высшем уровне управления (рис. 1.9). Системы управления, построенные по такому принципу, называются **распределенными**.

Применение принципа распределенных систем позволяет достичь повышения степени централизации управления с сохранением необходимой живучести автоматизированного технологического комплекса в целом, так как при отказе микро-ЭВМ может быть потеряно автоматическое управление лишь одной функциональной группой, а не всем объектом (технологическим процессом). При этом достигается не только снижение общего количества средств автоматизации, но и уменьшается количество информационных связей с высшими уровнями АСУ ТП. В норме вся информация, необходимая для управления данной группой, не выходит за ее рамки.

Современное промышленное производство средств автоматизации ориентируется в основном на изготовление агрегатированных комплексов средств. При этом

в серийном производстве находятся как комплексы аналоговых средств, так и комплексы средств вычислительной техники. Агрегатированный функциональный состав средств в рамках каждого комплекса обычно

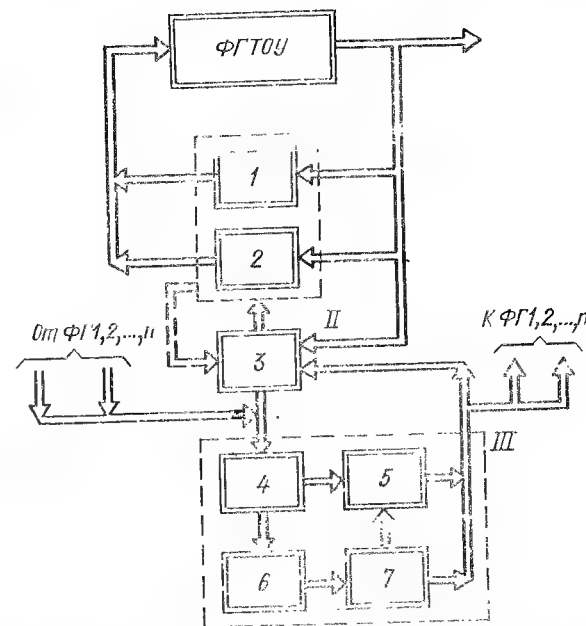


Рис. 1.9. Обобщенная техническая структура АСУ ТП с функционально-групповым управлением.

*I* — первый уровень иерархии (управление отдельными механизмами и регуляторами); *II* — второй уровень иерархии (управление функциональной группой); *III* — третий уровень иерархии (общегрупповое управление). 1, 2 — локальные схемы управления группой на аналоговых средствах; 3 — централизованная схема управления группой (на микро-ЭВМ); 4, 5 — общегрупповые информационно-вычислительные и управляющие комплексы; 6, 7 — средства отображения информации и оперативного управления.

рассчитан на полную реализацию какой-либо крупной части, подсистемы или функции АСУ ТП, т. е. позволяет строить в рамках этой части, подсистемы, функции управляющие и информационные контуры самого различного назначения, сложности и конфигурации.

## ПРИНЦИПЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА АНАЛОГОВЫХ СРЕДСТВАХ

### 2.1. Исходные требования к характеристикам и составу технических средств АСР

Автоматическое регулирование относится к числу наиболее изученных управляющих функций АСУ ТП. Алгоритмы регулирования носят в основном типовой характер и практически не зависят от физических особенностей объектов управления. Функциональный состав современных технических средств для автоматического регулирования разнообразен и позволяет реализовать практически все целесообразные варианты алгоритмов и схем.

Ниже рассматриваются исходные требования к функциональному составу средств автоматического регулирования и принципы реализации основных алгоритмов регулирования на аналоговых средствах. Эти же принципы могут быть использованы как исходные и при разработке алгоритмов непосредственного цифрового регулирования (НЦР) на базе средств вычислительной техники.

#### Обобщенная техническая структура типовой АСР

Для технической реализации типовой одноконтурной АСР необходимо построить замкнутый контур регулирования (рис. 2.1) с устройствами оперативного управления, позволяющими персоналу вмешиваться в работу системы. Совокупность устройств, обеспечивающих реализацию заданного алгоритма в замкнутом контуре АСР, будем называть регулятором.

История развития автоматизации начиналась с применения регуляторов прямого действия (см. рис. В.1). В этих простейших устройствах для приведения в движение регулирующего органа использовалась энергия сигнала датчика. Такие регуляторы применяются и до сих пор. Имеются, например, регуляторы температуры (с манометрическим термометром), поплавковые регуляторы уровня, регуляторы давления и перепада давления с мембранным приводом, построенные по принципу прямого воздействия датчика на регулирующий орган.

На рис. 2.2 приведена принципиальная схема одного из таких устройств, используемых для стабилизации давления в трубопроводах с неагрессивными средами.

Однако преимущество максимальной простоты регуляторов прямого действия не компенсирует серьезных недостатков такого принципа реализации АСР.

Во-первых, это решение позволяет реализовать лишь простейшие алгоритмы и мало пригодно для реализации сложных алгоритмов и схем АСР.

Во-вторых, это решение носит частный характер, так как в большинстве случаев практически невозможно построить датчики с таким выходным сигналом, который оказался бы достаточно мощным для привода крупных регулирующих органов (задвижек, вентиля и т. п.).

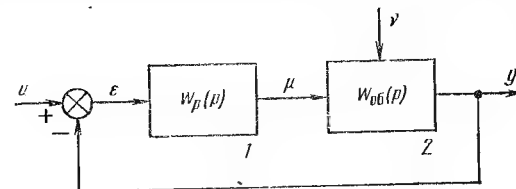


Рис. 2.1. Структурная схема одноконтурной АСР.  
1 — регулятор; 2 — объект.

В-третьих, регуляторы прямого действия неудобны для оперативного управления и связи с высшими уровнями иерархии АСУ (сложно дистанционно менять задание, осуществлять ручное управление и т. п.). Поэтому в современных АСУ регуляторы прямого действия находят лишь ограниченное применение.

Обычно для реализации автоматического регулирования наиболее важных технологических параметров применяются регуляторы косвенного действия (см. рис. В.2). В таких регуляторах для привода регулирующего органа используется энергия от независимого источника питания, не связанного с датчиком регулируемой величины (например, в схеме рис. В.2 таким источником является двигатель маслонасоса).

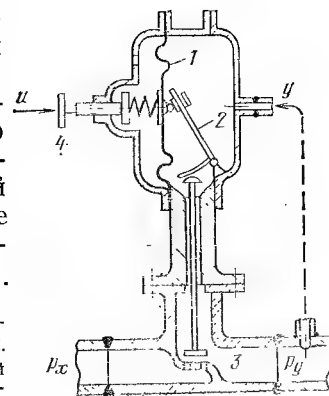


Рис. 2.2. Принципиальная схема регулятора давления прямого действия.  
1 — мембрана датчика; 2 — управляющий рычаг; 3 — регулирующий орган; 4 — датчик.

Практика автоматизации выделила три основных типа устройств для привода регулирующих органов в регуляторах косвенного действия:

электрические исполнительные механизмы на базе электродвигателя с релейным управлением или исполнительные механизмы постоянной скорости (см. рис. 1.6);

пневматические исполнительные механизмы на базе мембранного или поршневого двигателя (см. рис. 1.7, а);

гидравлические исполнительные механизмы на базе поршневого двигателя (см. рис. 1.7, б).

Регулятор косвенного действия, построенный на средствах промышленного назначения, состоит (рис. 2.3) из набора различных блоков и устройств, каждое из которых реализует определенные функциональные операции.

Для реализации функций автоматического регулирования необходимо получить сигнал, несущий информацию о регулируемой величине  $y$ , преобразовать его в соответствии с алгоритмом регулирования в управляющий сигнал  $z$  и, наконец, осуществить преобразование последнего в регулирующее воздействие  $u$ .

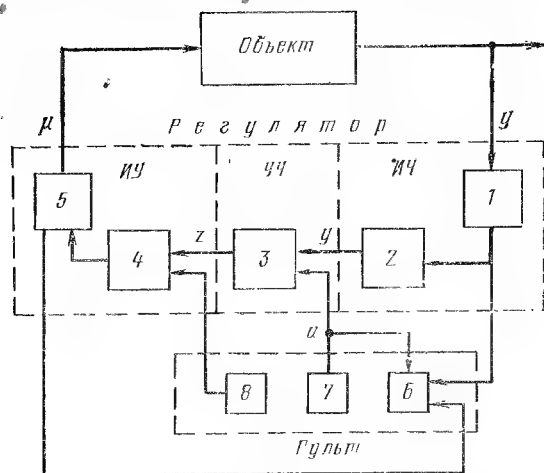


Рис. 2.3. Техническая структура типовой АСР.

ИЧ — измерительная часть; УЧ — управляющая часть; ИУ — исполнительные устройства; 1, 2 — первичный и вторичный измерительные преобразователи; 3 — регулирующий блок; 4 — усилитель мощности; 5 — исполнительный механизм; 6 — приборы-индикаторы; 7 — задающее устройство; 8 — блок ручного управления.

Будем выделять в регуляторе средства получения информации (или приборы, блоки и устройства измерительной части АСР), средства преобразования информации (или блоки и устройства управляющей части АСР) и, наконец, исполнительные устройства (или устройства исполнительтной части АСР). Возможность участия человека-оператора в управлении работой АСР обеспечивается средствами оперативного управления.

К измерительной части АСР будем относить первичные и вторичные измерительные преобразователи.

Первичные измерительные преобразователи являются датчиками регулируемой величины и осуществляют преобразование изменений параметра объекта  $y$  в изменения энергетического потенциала сигнала-носителя информации (например, температуры в термо-ЭДС или температуры в давление газа).

Вторичные измерительные преобразователи служат для согласования выхода датчика со входами управляющей части АСР. Преобразователи выполняют операции по изменению энергетических потенциалов сигнала (например, усилители, делители, нормирующие преобразователи); по изменению вида сигнала-носителя (например, пневматического в электрический и т. п.); по преобразованию кода сигнала (например, аналоговый в цифровой и т. п.).

Вторичный измерительный преобразователь не является обязательным устройством АСР; может отсутствовать, если измерительная и управляющая части АСР реализованы на средствах ГСП и имеют одинаковый вид сигнала-носителя информации.

Измерительная часть АСР строится на таких же (а часто и на тех же) первичных и вторичных измерительных преобразователях, что используются в других информационных каналах АСУ. Общее назначение средств измерительной части сводится к реализации основного уравнения измерения, которое для случая прямых измерений может быть записано в виде передаточной функции

$$W_{\text{и.ч.}}(p) = K_{\text{и.ч.}} \quad (2.1)$$

однозначно определяющей идеальный алгоритм преобразования информации в измерительной части АСР. В соответствии с назначением при реализации такого алгоритма на первый план выдвигается требование заданной точности (количественно оцениваемой по пределам допускаемых погрешностей).

Управляющая часть АСР может состоять из одного или нескольких блоков, реализующих выбранный при проектировании алгоритм регулирования. Для реали-

зации типовых алгоритмов необходимо располагать блоками, осуществляющими простейшие линейные операции статического и динамического преобразования информации (в том числе усиление, алгебраическое суммирование, интегрирование и дифференцирование сигналов). В более сложных случаях необходима также реализация нелинейных и логических операций. В АСР вида, показанного на рис. 2.1, с типовыми алгоритмами все операции управляющей части реализуются, как правило, на одном блоке. Принято называть такой блок регулирующим.

В состав исполнительной части типовой АСР обычно входят исполнительный механизм и согласующее устройство (усилители мощности, пускатели и пр.).

Средства оперативного управления относятся к высшему уровню иерархии управления, решающему задачи оптимизации заданного значения  $u$ , оптимизации структуры регулятора  $W_p(p)$ , а также диагностики и резервирования работы АСР. С этой целью простейшие АСР оснащаются приборами-индикаторами, показывающими значения  $u$ ,  $y$ ,  $\mu$ , задающими устройствами для изменения значения  $u$ , переключателями режимов работы («автоматическое регулирование — ручное управление») и кнопками воздействия на исполнительные устройства в режиме «ручное управление». Последние обычно совмещены конструктивно в одном устройстве, которое называется блоком ручного (или дистанционного) управления.

Основное назначение управляющей части АСР состоит в формировании заданного алгоритма регулирования. Динамика исполнительной части АСР определяется типом применяемых исполнительных устройств, выбираемым по условиям безопасности и надежности. Динамика измерительной части АСР задана основным уравнением измерения. Поэтому динамика управляющей части АСР должна быть подобрана таким образом, чтобы алгоритм преобразования информации всего регулирующего контура (рис. 2.3) соответствовал выбранному при проектировании идеальному алгоритму регулирования. Иначе говоря, алгоритм преобразования информации в управляющей части АСР однозначно определен заданным алгоритмом регулирования и динамическими характеристиками исполнительной и измерительной частей. Так, при линейной динамике исполнительной части  $W_{и.м}(p)$  для всего регулятора в целом будем иметь:

$$W_p(p) = W_{и.ч}(p) W_{у.ч}(p) W_{и.м}(p). \quad (2.2)$$

Тогда для реализации заданного алгоритма регулирования  $W_p(p)$  необходимо реализовать управляющую часть с алгоритмом преобразования информации, отвечающим соотношению

$$W_{у.ч}(p) = \frac{W_p(p)}{W_{и.ч}(p) W_{и.м}(p)}. \quad (2.3)$$

### Типовые алгоритмы регулирования

Известно, что для идеализированных условий работы АСР вида, показанного на рис. 2.1 (при линейных характеристиках объекта  $W_{об}(p)$ , стационарных случайных возмущениях  $\{v\}$ ), оптимальный регулятор, обеспечивающий в среднем наилучшую стабилизацию регулируемой величины, должен также иметь линейные характеристики. Динамика оптимального регулятора в первом приближении может быть представлена передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{p}{\varepsilon(p)} = \frac{c_m p^m + \dots + c_1 p + c_0}{d_n p^n + \dots + d_1 p + d_0}, \quad (2.4)$$

причем на практике структуры с числом варьируемых коэффициентов  $c_i$ ,  $d_i$  (параметров настройки АСР) более двух-трех обычно не используются.

Ограничение числа параметров настройки определяется следующими причинами. Во-первых, выигрыш качества регулирования от применения более сложных структур в большинстве случаев относительно невелик, процесс настройки регулятора становится более сложным и трудоемким. Во-вторых, точная техническая реализация таких структур требует увеличения диапазона скоростей и мощностей регулирующего воздействия. Это же ведет к усложнению устройств исполнительной части АСР и в конечном счете к снижению надежности регулирования.

При проектировании АСР применяются частные варианты (2.4) с числом параметров не более трех. Соответствующие математические операторы называются типовыми алгоритмами (или законами) регулирования. Различают алгоритмы:

пропорциональный (П)

$$W_p(p) = K_p, \quad (2.5)$$

интегральный (И)

$$W_p(p) = \frac{1}{T_{ср} p}, \quad (2.6)$$

пропорционально-интегральный (ПИ)

$$W_p^{ПИ}(p) = K_p + \frac{1}{T_c p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_c p}\right), \quad (2.7)$$

пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)

$$W_p^{ПИД}(p) = K_p \left(T_d p + 1 + \frac{1}{T_i p}\right). \quad (2.8)$$

Коэффициенты  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_c$ ,  $T_d$  называются параметрами настройки регулятора. Приняты следующие наименования этих параметров:

- $K_p$  — коэффициент передачи;
- $T_c$  — постоянная интегральной части;
- $T_i$  — постоянная времени интегрирования;
- $T_d$  — постоянная времени дифференцирования.

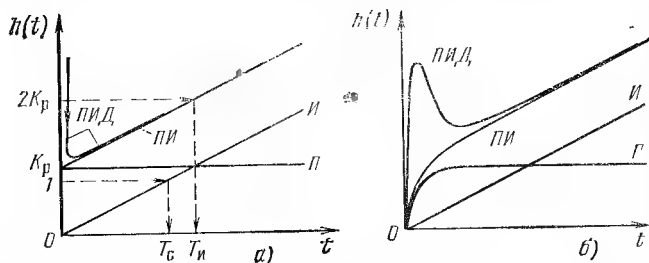


Рис. 2.4. Переходные характеристики регуляторов с идеальными (а) и реальными (б) динамическими характеристиками.  
 $P$  — пропорциональный алгоритм;  $I$  — интегральный алгоритм;  $PI$  — пропорционально-интегральный алгоритм;  $PID$  — пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритм.

Математическое выражение переходной характеристики ПИД-алгоритма имеет вид:

$$h(t) = K_p T_d \delta(t) + K_p \cdot 1(t) + \frac{K_p}{T_i} t \cdot 1(t), \quad (2.9)$$

где  $\delta(t)$  — дельта-функция;  $1(t)$  — единичная ступенчатая функция.

Математические выражения  $h(t)$  для  $P$ -,  $I$ -,  $PI$ -алгоритмов могут быть получены в соответствии с (2.5) — (2.8) как частные случаи (2.9).

На рис. 2.4, а представлены соответствующие графики их переходных характеристик. Переходные характеристики идеальных ПИД- и  $PI$ -алгоритмов различаются составляющей  $K_p T_d \delta(t)$ , т. е. различаются лишь

в момент  $t=0$ , где значение  $h(0)$  для ПИД-алгоритма должно быть бесконечно большим\*.

Погрешность реализации идеальных алгоритмов реальной системой может быть оценена при сопоставлении их переходных характеристик.

На рис. 2.4, б представлены некоторые варианты переходных характеристик реальных систем.

Соотношения (2.5) — (2.8) определяют идеальные проектные алгоритмы, к которым, в принципе, должны приближаться динамические характеристики регуляторов в целом. Алгоритмы управляющей части регулятора должны при этом определяться с учетом характеристик исполнительных устройств (в линейном приближении) в соответствии с (2.3).

### Динамические характеристики типовых исполнительных механизмов

Подпружиненный мембранный исполнительный механизм (см. рис. 1.7, а) может рассматриваться в первом приближении как звено с нелинейной статической характеристикой (рис. 2.5, а). Крутизна его характеристики находится в прямой зависимости от площади мембраны и в обратной — от коэффициента жесткости пружины (несколько возрастающей по мере ее сжатия). Соответственно при малых изменениях  $\mu$  динамику механизма можно представить характеристиками пропорционального ( $P$ ) звена

$$W_{и.м}(p) = \frac{\Delta \mu(p)}{\Delta z(p)} = K_{и.м}, \quad (2.10)$$

причем коэффициент передачи  $K_{и.м}$  несколько убывает с ростом  $\mu$ .

Динамика поршневого исполнительного механизма (см. рис. 1.7, б) при известных допущениях может быть представлена характеристикой интегрирующего ( $I$ ) звена

$$\mu' = \frac{1}{T_{и.м}} z, \quad (2.11)$$

где  $z = \Delta p$  — перепад давлений на поршне;  $T_{и.м}$  — постоянная исполнительного механизма.

\* Напомним, что функция  $\delta(t)$  равна нулю при  $t \neq 0$ , стремится к бесконечности при  $t \rightarrow 0$  и является математической абстракцией кратковременного импульса.

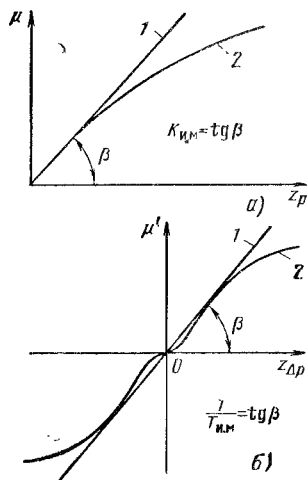


Рис. 2.5. Характеристики мембранного (а) и поршневого (б) исполнительного механизмов.  
1 — идеальная линейная характеристика; 2 — реальная характеристика.

График уравнения (2.11) имеет вид прямой линии (1 на рис. 2.5, б). Однако постоянная интегрирования реального исполнительного механизма заметно возрастает при больших скоростях перемещения поршня (что связано с резким увеличением сил вязкого трения при больших скоростях). Поэтому аналогичная характеристика реального исполнительного механизма (2 на рис. 2.5, б) при больших  $\mu'$ ,  $z$  нелинейна. Динамика поршневого исполнительного механизма достаточно близка к характеристикам И-звена в широком диапазоне  $\mu'$ ,  $z$  и может быть представлена передаточной функцией

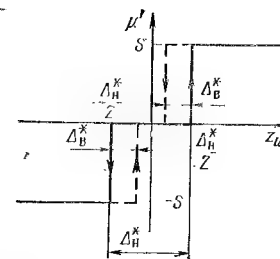
$$W_{и.м}(p) = \frac{\mu(p)}{z(p)} = \frac{1}{T_{и} p}. \quad (2.12)$$

Исполнительный механизм постоянной скорости (см. рис. 1.6) может находиться только в трех установившихся состояниях: вращение ротора с постоянной скоростью  $S$ , неподвижность, вращение ротора с той же скоростью  $S$  в противоположную сторону. В первом приближении (при малых временах разгона и замедления ротора) можно представить динамическую характеристику такого механизма следующей логической системой:

$$\left. \begin{aligned} |z| > \frac{\Delta^*_{и}}{2} &\longrightarrow |\mu'| = S, \\ |z| < \frac{\Delta^*_{и}}{2} &\longrightarrow |\mu'| = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

или графиком рис. 2.6, где  $\Delta^*_{и}$  — зона нечувствительности пускового устройства.

Рис. 2.6. Характеристика исполнительного механизма постоянной скорости.



В случае применения электромагнитных пусковых устройств (вида по рис. 1.6) характеристика исполнительной части несколько усложняется. Гистерезисные явления в магнитных цепях приводят к появлению зон возврата  $\Delta^*_{в}$  (пунктир на рис. 2.6), и исполнительный механизм отключается при нескольких меньших значениях входного сигнала ( $z = \frac{\Delta^*_{и}}{2} - \Delta^*_{в}$ ), чем включается.

Характеристика исполнительного механизма постоянной скорости является существенно нелинейной, т. е. всякие линейные аппроксимации графика рис. 2.6 недопустимы, так как приводят к качественным отличиям результатов дальнейших теоретических изысканий от реального поведения АСР. Однако тот же исполнительный механизм может иметь близкие к линейным характеристики при работе с импульсными входными сигналами.

Пусть на вход исполнительного механизма постоянной скорости поступает импульсное напряжение  $z_u$  (рис. 2.7, а), причем амплитуда напряжения принимает только два значения (0, А), а носителем информации является скважность импульсов  $\gamma$ , поступающих с периодом  $T = \Delta t_{и} + \Delta t_{п}$ :

$$\gamma = \frac{\Delta t_{и}}{T}, \quad (2.14)$$

где  $\Delta t_{и}$  — время включения напряжения и движения ротора ИМ;  $\Delta t_{п}$  — время отключения напряжения и паузы в движении ротора ИМ.

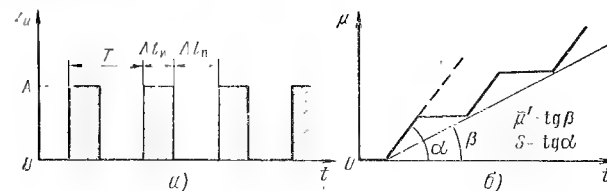


Рис. 2.7. Реакция исполнительного механизма постоянной скорости (б) и импульсный сигнал (а).



Тогда график изменения выхода ИМ постоянной скорости будет иметь вид, показанный на рис. 2.7, б, причем средняя скорость движения  $\bar{\mu}'$  будет связана со скважностью линейным соотношением

$$\bar{\mu}' = \frac{\Delta t_n S}{T} = S\gamma. \quad (2.15)$$

Таким образом, по отношению к скважности импульсного сигнала исполнительный механизм постоянной скорости ведет себя в среднем как И-звено и его характеристику можно представить передаточной функцией

$$W_{И-М}(p) = \frac{\bar{\mu}(p)}{\gamma(p)} = \frac{S}{p}. \quad (2.16)$$

## 2.2. Принципы и схемы технической реализации алгоритмов регулирования

### Коррекция характеристик звеньев введением обратных связей

При реализации алгоритмов регулирования (2.5)—(2.8) обычно прибегают к коррекции характеристик исходных технических устройств введением обратных связей. Для этого используются такие обратные связи, при которых динамика всей замкнутой системы опре-

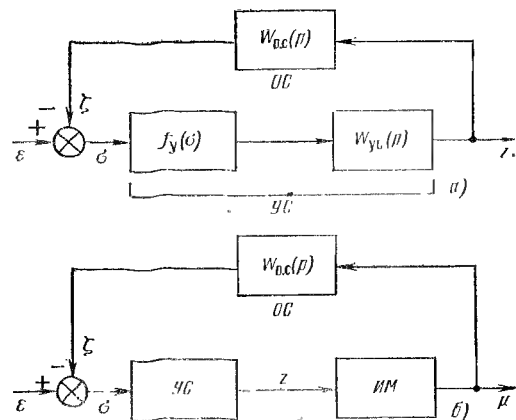


Рис. 2.8. Коррекция характеристик устройств введением функциональной обратной связи.

УС — усилитель; ОС — обратная связь; ИМ — исполнительный механизм.

деляется главным образом свойствами обратной связи и практически не зависит от других устройств, входящих в замкнутый контур. Будем называть такие обратные связи функциональными.

Принципы коррекции характеристик введением функциональных обратных связей (ФОС) рассмотрим на примере замкнутой структуры (рис. 2.8, а). Эта структура состоит из устройства суммирования, нелинейного звена со статической характеристикой  $f_\gamma(\sigma)$ , некоторой линейной динамической части  $W_{\gamma\mu}(p)$  и звена функциональной обратной связи  $W_{o.c.}(p)$ . При отрицательной обратной связи сигнал связи  $\xi$  будет компенсировать входной сигнал  $\varepsilon$ . Поэтому сигнал  $\sigma$  на выходе сумматора будет меньше, чем  $\varepsilon$ :

$$|\sigma| = |\varepsilon - \xi| < |\varepsilon|.$$

Отсюда при малых значениях  $\sigma$ , т. е. когда

$$|\sigma| \ll |\varepsilon|, \quad (2.17)$$

получаем, что сигнал  $\xi$  на выходе обратной связи практически равен входному сигналу  $\varepsilon$ . Поскольку сигнал  $\xi$  связан с выходом системы  $z$  передаточной функцией  $W_{o.c.}(p)$ , то получаем, что

$$\xi = W_{o.c.}(p) z \approx \varepsilon$$

или

$$W_{z.c.}(p) = \frac{z(p)}{\varepsilon(p)} \approx \frac{1}{W_{o.c.}(p)}. \quad (2.18)$$

Таким образом, во всех случаях, когда можно добиться выполнения условия (2.17), динамика структуры (рис. 2.8, а) будет определяться только характеристикой обратной связи.

Аналогично получаем, что при выполнении (2.17) в структуре (рис. 2.8, б), динамика этой структуры по каналу  $\varepsilon \rightarrow \mu$  будет также определяться лишь характеристикой обратной связи, т. е.

$$W_{\varepsilon \mu}(p) = \frac{\mu(p)}{\varepsilon(p)} \approx \frac{1}{W_{o.c.}(p)}.$$

Таким образом, при линейной обратной связи характеристики замкнутой системы можно сделать близкими к линейным даже в том случае, когда в ее состав входят и звенья с существенно нелинейными свойствами; надо лишь выполнить условие (2.17).

Можно ли всегда и безусловно выполнить условие (2.17)? Сигнал  $\xi$  будет тем быстрее компенсировать  $\epsilon$ , чем больше коэффициент передачи от  $\epsilon$  к  $\xi$  в разомкнутой системе. При бесконечно большом коэффициенте усиления сигнал обратной связи  $\xi$  мгновенно компенсировал бы любые изменения входного сигнала  $\epsilon$ . Однако даже просто большой коэффициент усиления в разомкнутой системе может привести к неустойчивости замкнутой системы. Поэтому достаточно большой для выполнения поставленных требований коэффициент можно устанавливать лишь в системах с бесконечно большим запасом устойчивости (в системах, устойчивых при любых значениях параметров). Замкнутая система, получающаяся при больших коэффициентах передачи разомкнутого контура, называется предельной.

#### Коррекция динамики устройств с линейными характеристиками

Рассмотрим эту задачу на примере реализации типовых алгоритмов регулирования (2.5)–(2.7) в АСР с поршневым исполнительным механизмом (см. рис. 1.7, б). Для реализации И-алгоритма регулирования здесь необходимо лишь преобразовать отклонение регулируемой величины в достаточно мощный сигнал перепада давлений, так как сам исполнительный механизм имеет характеристики И-звена (2.12). Но за счет охвата исполнительного механизма функциональными обратными связями можно реализовать и другие алгоритмы регулирования. Так, если в схеме рис. 2.8, б принять  $W_{и.м}(p)$ , равной передаточной функции (2.12), а характеристику усилителя считать линейной и безынерционной (т. е.  $z = K_y \sigma$ ), то динамика канала  $\epsilon \rightarrow \mu$  может быть представлена передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{K_y W_{и.м}(p)}{1 + K_y W_{и.м}(p) W_{о.с}(p)}. \quad (2.19)$$

Если выполнить схему таким образом, что при любом  $p$  выполняется условие

$$K_y W_{и.м}(p) W_{о.с}(p) \gg 1, \quad (2.20)$$

то, как это следует из (2.19), получаем:

$$W_p(p) \approx \frac{1}{W_{о.с}(p)}. \quad (2.21)$$

Таким образом, при обратной связи с характеристикой пропорционального звена (жесткая обратная связь)

$$W_{о.с}(p) = K_{о.с} \quad (2.22)$$

получаем П-алгоритм регулирования

$$W_p(p) = K_p = \frac{1}{K_{о.с}}.$$

При обратной связи с характеристикой реального дифференцирующего звена

$$W_{о.с}(p) = K_{о.с} \frac{T_{о.с} p}{T_{о.с} p + 1} \quad (2.23)$$

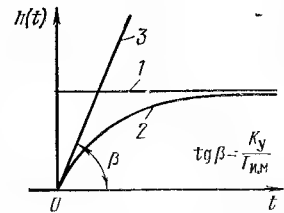
будем соответственно иметь ПИ-алгоритм

$$W_p(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_{и} p} \right) = \frac{1}{K_{о.с}} \frac{T_{о.с} p + 1}{T_{о.с} p}. \quad (2.24)$$

Условие (2.20) является в данном случае условием реализации предельной системы, когда  $|\epsilon| \gg |\sigma|$ .

Рис. 2.9. Динамика поршневого исполнительного механизма с жесткой обратной связью.

1 — переходная характеристика идеального П-регулятора; 2 — то же, для реального регулятора; 3 — то же, для ИМ без обратной связи.



Отметим, что реально это условие не может быть выполнено при  $p \rightarrow \infty$ . Нельзя добиться и точного выполнения (2.22), но можно, как правило, достигнуть в целом хороших приближений. При этом наибольшие расхождения в реакциях системы (2.21) и реальной системы (2.19) будут иметь место лишь в начальные моменты времени после подачи возмущений (рис. 2.9), так как при  $p \rightarrow \infty \lim W(p, \infty) = \lim h(t \rightarrow 0)$ .

Так, например, для поршневого исполнительного механизма с гидравлическим усилителем  $W_{у.с}(p) = K_y$  и с обратной связью в виде П-звена  $W_{о.с}(p) = K_{о.с}$  (жесткая обратная связь) выполнение (2.20), (2.21) будет иметь место при

$$\frac{K_y K_{о.с}}{T_{и.м} p} \gg 1. \quad (2.25)$$

При этом найденная из (2.19) передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = \frac{1}{\frac{T_{и.м} p}{K_y K_{о.с}} + 1} \frac{1}{K_{о.с}} \rightarrow \frac{1}{K_{о.с}}.$$

стремится к П-алгоритму, и различие между реакциями идеального и реального регулятора исчезает только при  $|p| \ll \frac{K_y K_{o.c}}{T_{н.м}}$ .

### Коррекция динамики устройств с нелинейными характеристиками

Рассмотрим эту задачу на примере мембранного исполнительного механизма с нелинейной характеристикой вида рис. 2.5, а. Если такой исполнительный механизм входит в систему (см. рис. 2.8) с жесткой обратной связью (2.22), то при достаточно больших значениях произведения  $(K_y K_{н.м} K_{o.c})$  динамика всей системы будет иметь характеристику пропорционального звена

$$\mu_c = \frac{1}{K_{o.c}} \epsilon. \quad (2.26)$$

Таким образом, охват исполнительного механизма жесткой обратной связью как бы линеаризует его характеристики. При этом линеаризация здесь достигается за счет того, что выход исполнительного механизма (в данном случае — перемещение мембраны) изменяется до тех пор, пока эти изменения через обратную связь не компенсируют входной сигнал. Устройство жесткой обратной связи в таких схемах обычно называется позиционером.

Рис. 2.10. Схема линеаризации исполнительной части АСР и стабилизации регулирующего воздействия.

Часто таким же образом добиваются линейности характеристик исполнительной части системы управления в целом. Для этого жесткой обратной связью охватывается не только исполнительный механизм, но и регулирующий орган (рис. 2.10). Тогда при достаточно большом коэффициенте усиления разомкнутого контура  $(K_{н.м} K_{р.о} \gg 1)$  динамика замкнутой системы по каналу  $z \rightarrow x$  будет также соответствовать передаточной функции пропорционального звена (поскольку  $\xi \rightarrow z$ ): Одновременно такая структура стабилизирует воздействие  $x$ . Так, при любых изменениях  $x$ , не связанных с управляющим сигналом  $z$ , появляется разба-

ланс между  $z$  и  $\xi$  и исполнительный механизм переместит регулирующий орган в сторону компенсации разбаланса.

### Особенности динамики систем с релейными характеристиками в замкнутом контуре

Для устройств с релейными элементами, включенными в замкнутый контур с отрицательной обратной связью, характерны автоколебательные режимы работы. Сущность таких режимов покажем на примере замкнутой структуры (рис. 2.8, б), состоящей из исполнительного механизма постоянной скорости с жесткой обратной связью.

Увеличение входного сигнала  $\epsilon$ , суммарного сигнала  $\sigma = \epsilon - \xi$  и выход сигнала  $z$  за пределы зоны нечувствительности  $\Delta^*_{н}$  вызывает (см. рис. 2.6) включение двигателя исполнительного механизма и изменение регулирующего воздействия  $\mu$ . Связанное с этим изменение сигнала обратной связи  $\xi$  компенсирует увеличение  $\epsilon$ , уменьшает суммарный сигнал  $\sigma$  и сигнал  $z$ , что приводит к отключению двигателя. После этого  $\mu = \text{const}$ ,  $\xi = \text{const}$  и при дальнейшем увеличении  $\epsilon$  сигнал  $z$  вновь выходит за пределы  $\Delta^*_{н}$ , что вызывает новое включение двигателя. Новые изменения  $\mu$  и  $\xi$  опять отключают двигатель, так что при дальнейшем изменении входного сигнала  $\epsilon$  процесс периодических срабатываний исполнительного механизма будет продолжаться. При этом исполнительный механизм работает в импульсном режиме (см. рис. 2.7), а связь между входом  $\epsilon$  и выходом  $\mu$  определяется соотношением (2.21) и в данном случае близка к П-алгоритму (2.5).

Такой же автоколебательный режим работы характерен и для других структур с релейной характеристикой вида, показанного на рис. 2.6, в замкнутом контуре. Более подробный анализ таких структур дается в § 2.3.

### Основные схемы реализации типовых алгоритмов регулирования

Принципы реализации заданных алгоритмов с помощью функциональных обратных связей широко используются при автоматизации. Обратные связи применяются как для реализации требуемой динамики отдельных устройств, так и для построения заданных ал-

горитмов регулирования в целом. Можно выделить три основных варианта использования функциональных обратных связей для реализации заданных алгоритмов регулирования.

В первом варианте (рис. 2.8, б) обратная связь охватывает устройства исполнительный и управляющей частей регулятора. Здесь в соответствии с (2.18) динамика регулятора целиком определяется свойствами обратной связи. Поэтому для получения заданного алгоритма регулятора необходимо реализовать оператор  $W_{o.c}(p)$  и оператор суммирования (и, иногда, уси-

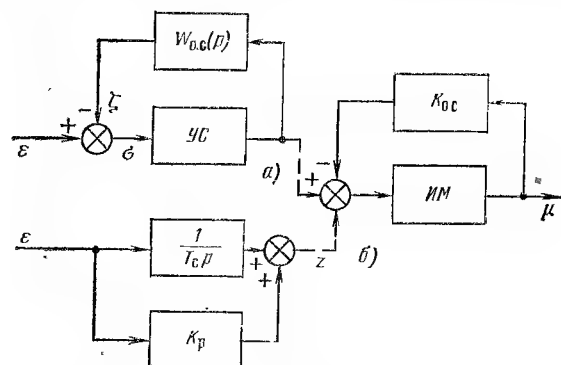


Рис. 2.11. Варианты структуры регулятора с жесткой обратной связью в исполнительной части АСР.

ния) сигналов  $\varepsilon$  и  $\zeta$ . Поскольку оператор  $W_{o.c}(p)$  должен соответствовать (2.21), то для реализации ПИ-алгоритма регулирования в обратной связи необходимо иметь реальное дифференцирующее звено (2.23).

Во втором варианте (рис. 2.11) обратная связь используется лишь для коррекции характеристик исполнительной части регулятора. При этом обычно применяется жесткая обратная связь (2.22), так что динамика исполнительной части в целом становится близкой к характеристике пропорционального звена. В управляющей части регулятора необходимо тогда полностью реализовать весь заданный алгоритм регулирования, причем для его построения можно также использовать местные обратные связи (рис. 2.11, а). Для реализации ПИ-алгоритма обратная связь должна здесь по-прежнему иметь характеристики (2.23). Однако применение местных обратных связей в управляющей части регулятора

совсем необязательно, и ПИ алгоритм регулирования может быть построен просто на базе элементов с характеристиками П- и И-звеньев (рис. 2.11, б).

Третий вариант (рис. 2.12) предполагает отсутствие обратных связей в исполнительной части регулятора.

Алгоритм управляющей части регулятора должен выбираться здесь в соответствии с (2.9) с учетом динамики исполнительных устройств. Так, при использовании исполнительных механизмов с характеристиками И-звена (2.12), (2.16) в управляющей части регулятора с ПИ-алгоритмом следует реализовать пропорционально-дифференциальный алгоритм

$$W_{y.ч}(p) = K(1 + T_{ин}p). \quad (2.27)$$

В таком случае передаточная функция всей структуры в целом

$$W_p(p) = W_{y.ч}(p) W_{и.м}(p)$$

будет соответствовать характеристикам ПИ-алгоритма (2.7). Для исполнительного механизма постоянной скорости выходной сигнал  $z$  управляющей части должен быть импульсным, а связь входного сигнала  $\varepsilon$  со скважностью импульсов  $\gamma$  должна (хотя бы в первом приближении) соответствовать (2.27).

Для реализации (2.27) в управляющей части регулятора можно также использовать функциональную обратную связь, причем динамика этой связи должна описываться передаточной функцией, обратной (2.27):

$$\left. \begin{aligned} W_{o.c}(p) &= \frac{K_{o.c}}{T_{o.c}p + 1} \\ K_{o.c} &= \frac{1}{K}; \quad T_{o.c} = T_{ин} \end{aligned} \right\} \quad \text{откуда} \quad (2.28)$$

Таким образом, при реализации ПИ-алгоритма регулирования по схеме рис. 2.12 функциональная обратная связь в управляющей части регулятора должна

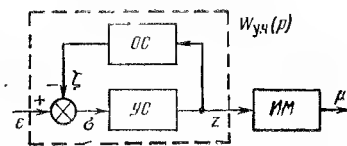


Рис. 2.12. Вариант структуры регулятора без обратных связей в исполнительной части АСР.

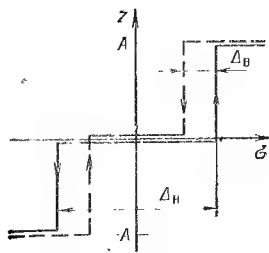


Рис. 2.13. Характеристика релейного усилителя (с зоной нечувствительности и с зоной возврата).

иметь характеристики аperiodического звена. Если при этом регулятор строится на базе исполнительного механизма постоянной скорости, то замкнутая структура в управляющей части должна включать звено с релейными характеристиками (рис. 2.13), что позволяет получить на выходе управляющей части последовательность импульсов, скважность у которых связана с входным сигналом  $\varepsilon$  передаточной функцией (2.27).

### 2.3. Принцип действия релейно-импульсного регулятора

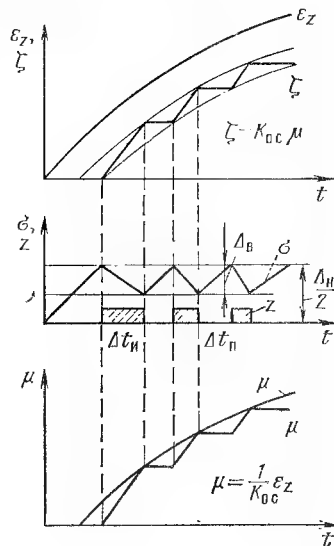
#### Динамика релейно-импульсного регулятора с П-алгоритмом регулирования

Регулятор с исполнительным механизмом постоянной скорости может иметь близкие к линейным характеристики только при условии импульсного управления исполнительную частью АСР. Для генерации импульсов обычно используются структуры рис. 2.8, 2.11, 2.12 с релейными характеристиками в замкнутом контуре. Поэтому будем называть такой регулятор релейно-импульсным.

Принцип действия релейно-импульсного регулятора с П-алгоритмом (с жесткой обратной связью в структуре рис. 2.8, б) в общих чертах пояснен в § 2.2.

Рис. 2.14. Переходные процессы в замкнутой структуре с исполнительным механизмом постоянной скорости и с жесткой обратной связью.

$\varepsilon_z$  — вход исполнительного механизма АСР;  $\zeta$  — сигнал на выходе обратной связи;  $\sigma$  — сигнал на входе релейного усилителя;  $z$  — пусковые импульсы;  $\mu$  — выход исполнительного механизма.



Этот принцип может также использоваться и для линеаризации характеристик исполнительного механизма АСР по схемам, приведенным на рис. 2.10, 2.11. Тогда устройство управляющей части и вся АСР в целом могут реализовать любой заданный линейный алгоритм. Рассмотрим динамику такого регулятора более детально. Пусть входной сигнал  $\varepsilon$  в структуре рис. 2.8, б, состоящей из исполнительного механизма постоянной скорости с жесткой обратной связью, постепенно увеличивается (рис. 2.14). Включение исполнительного механизма произойдет только после того, как входной сигнал пускового устройства  $z$  выйдет за пределы зоны нечувствительности ( $|z| > \frac{\Delta_n^*}{2}$ , см. рис. 2.6). После этого изменение  $\mu$  вызовет изменение обратной связи  $\zeta$ :

$$\zeta = K_{0.c} \mu = K_{0.c} S t.$$

Если скорость изменения  $\zeta$  больше скорости изменения входного сигнала

$$|\zeta'| = K_{0.c} S > |\varepsilon'|,$$

то величина входа пускового устройства  $z = \varepsilon - \zeta$  начнет уменьшаться. При значении

$$z = \frac{\Delta_n^*}{2} - \Delta_n^* \quad (2.29)$$

произойдет отключение исполнительного механизма (см. рис. 2.6). При неизменном выходном сигнале исполнительного механизма  $\mu = \text{const}$  значение  $\zeta$  тоже постоянно. Так как входной сигнал  $\varepsilon$  по-прежнему увеличивается, то суммарный сигнал  $z$  также увеличивается и через некоторое время опять выйдет за пределы зоны нечувствительности. Тогда исполнительный механизм вновь сработает, а сигнал обратной связи вновь получит приращение  $\Delta\zeta$ , достаточное для компенсации изменений входа  $\varepsilon$  и уменьшения  $z$  до значения (2.29). При этом исполнительный механизм вновь отключится и при дальнейших изменениях  $\varepsilon$  процесс его периодических включений и отключений будет повторяться.

Таким образом, при выполнении условий

$$\left. \begin{aligned} |\varepsilon_z| &> \frac{\Delta_n}{2}, \\ |\zeta'| &> |\varepsilon'| > 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

замкнутый контур (см. рис. 2.11) входит в режим автоколебаний.

В таком режиме сигнал  $z$  на входе пускового устройства практически не выходит за пределы зоны нечувствительности  $\Delta_n^*$  и изменяется лишь в пределах зоны возврата  $\Delta_v^*$ , что фактически означает реализацию (2.17), (2.18).

Пусковое устройство работает в режиме периодических включений-отключений (пульсирующий режим) и осуществляет импульсное управление исполнительным механизмом. При этом соотношение между длительностью импульсов-включений  $\Delta t_n$  и пауз-отключений  $\Delta t_n$  получается таким, что

$$\overline{\mu'} = S\gamma = \frac{1}{K_{o.c}} \varepsilon', \quad (2.31)$$

и в замкнутой структуре рис. 2.11 реализуется П-алгоритм регулирования.

В самом деле, при выполнении (2.30) длительность отключений  $\Delta t_n$  равна:

$$\Delta t_n = \frac{\Delta_v}{|\varepsilon'|}, \quad (2.32)$$

а длительность включений  $\Delta t_n$  соответственно равна:

$$\Delta t_n = \frac{\Delta_v}{|\xi' - \varepsilon'|}. \quad (2.33)$$

Поэтому периодичность включений исполнительного механизма будет:

$$T = \Delta t_n + \Delta t_n = \frac{\Delta_v}{|\xi' - \varepsilon'|} \frac{|\xi'|}{|\varepsilon'|}, \quad (2.34)$$

а скважность импульсов

$$\gamma = \frac{\Delta t_n}{T} = \frac{|\varepsilon'|}{|\xi'|}. \quad (2.35)$$

Тогда при жесткой обратной связи  $\xi = K_{o.c} \mu$  с учетом (2.13), (2.35) получаем соотношение между входом и выходом замкнутой структуры (см. рис. 2.8,б) в виде (2.31).

Охват исполнительного механизма жесткой обратной связью может применяться не только для реализации П-алгоритмов (по схеме рис. 2.8,б), но и для реализации других вариантов линейных алгоритмов (по схеме рис. 2.11). Отметим, что преобразование сигналов в управляющей части регулятора может быть чисто

аналоговым, так как импульсные преобразования происходят в замкнутой структуре с исполнительным механизмом.

### Динамика релейно-импульсного регулятора с ПИ-алгоритмом регулирования

Релейно-импульсный регулятор с ПИ-алгоритмом регулирования обычно реализуется по структурной схеме рис. 2.12, где обратная связь с характеристикой апериодического звена охватывает релейный усилитель с характеристикой рис. 2.13. При этом релейный усилитель УС с апериодическим звеном ОС принято выполнять в виде отдельного устройства — регулирующего блока. В современных сериях регулирующих блоков, как правило, реализуются усложненные варианты апериодических звеньев обратной связи. Отличительной особенностью таких звеньев является различие динамических характеристик при увеличении и при уменьшении сигнала обратной связи, т. е. нелинейность характеристик обратной связи.

Динамика нелинейного звена обратной связи описывается уравнением

$$T_s \xi' + \xi = kA \quad (2.36)$$

при включении сигнала на выходе релейного усилителя и уравнением

$$T_p \xi' + \xi = 0 \quad (2.37)$$

при его отключении. (Здесь  $T_s$ ,  $T_p$  — постоянные нелинейного апериодического звена, а  $kA$  — сигнал на его входе). Соответственно скорости изменения сигнала обратной связи определяются соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \xi'_n &= \frac{kA - \xi_n}{T_s} \text{ при } z = \pm A, \\ \xi'_n &= -\frac{\xi_n}{T_p} \text{ при } z = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

Динамика структуры рис. 2.12 с релейным усилителем, охваченным обратной связью, и с исполнительным механизмом постоянной скорости определяется следующими соотношениями. При постепенном увеличении входного сигнала  $\varepsilon$  на выходе релейного усилителя появится (рис. 2.15) сигнал постоянного уровня  $z = A$ . Появится не сразу, а лишь после того, как суммарный

сигнал  $\sigma$  на входе усилителя выйдет за пределы зоны нечувствительности  $\Delta_n$ :

$$|\sigma| = |\varepsilon - \zeta| > \frac{\Delta_n}{2}. \quad (2.39)$$

При этом одновременно включается двигатель исполнительного механизма (с помощью пускового устройства) и на вход обратной связи усилителя поступает сигнал постоянного уровня  $kA$ . При этом сигнал на выходе обратной связи начинает увеличиваться в соответствии с (2.36), т. е. по экспоненте с постоянной  $T_3$ .

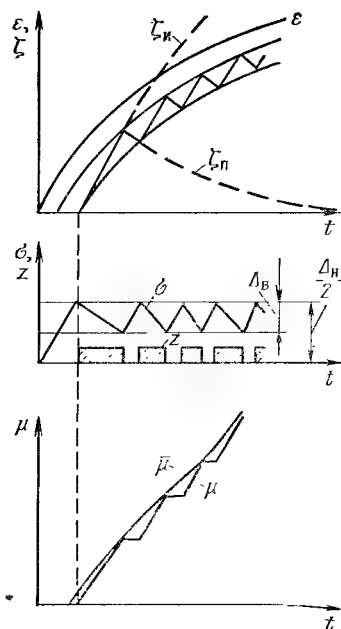
Если скорость нарастания сигнала обратной связи больше скорости входного сигнала

$$|\xi'_n| > |\varepsilon'|, \quad (2.40)$$

то сигнал  $\sigma$  на выходе релейного усилителя в соответствии с (2.39) будет убывать и такое уменьшение будет продолжаться до тех пор, пока сигнал не войдет в зону

$$|\sigma| \leq \frac{\Delta_n}{2} - \Delta_b.$$

При этом сигнал на выходе релейного усилителя исчезает, исполнительный механизм отключается, а вход



обратной связи становится равным нулю. Поэтому сигнал на выходе обратной связи начинает убывать и, если входной сигнал  $\varepsilon$  по-прежнему возрастает, то сигнал  $\sigma$  на входе релейного усилителя также увеличивается и опять выходит за пределы зоны нечувствительности  $\Delta_n$ .

Далее цикл повторяется, замкнутая структура с релейным усилителем входит в режим автоколебаний и

Рис. 2.15. Переходные процессы в релейно-импульсном регуляторе с ПИ-алгоритмом регулирования.  $\varepsilon$  — вход регулятора;  $\zeta$  — сигнал на выходе обратной связи;  $\sigma$  — сигнал на входе релейного усилителя;  $z$  — пусковые импульсы;  $\mu$  — выход исполнительного механизма.

геперирует на выходе последовательность импульсов, управляющих движением исполнительного механизма.

Параметры автоколебаний определяются из следующих соображений.

Время включения  $\Delta t_n$  и время отключения  $\Delta t_n$  сигнала на выходе усилителя определяется соотношениями, аналогичными (2.32), (2.33)

$$\Delta t_n = \frac{\Delta_n}{|\xi'_n - \varepsilon'|}, \quad (2.41)$$

$$\Delta t_n = \frac{\Delta_b}{|\varepsilon' - \xi'_n|}.$$

Значения скорости обратной связи при включении и отключении сигнала  $z$  на выходе усилителя определяются соотношениями (2.38).

Принимаем, что значения зоны нечувствительности и зоны возврата малы по сравнению с входным сигналом

$$|\varepsilon| \gg \frac{\Delta_n}{2}. \quad (2.42)$$

Так как сигнал  $\sigma$  на входе в релейный усилитель меняется в малых пределах:

$$\frac{\Delta_n}{2} \gg |\sigma| \geq \frac{\Delta_n}{2} - \Delta_b,$$

то можно принять, что  $\varepsilon - \zeta \approx 0$ .

Тогда, в соответствии с (2.38), скорости изменения выхода обратной связи будут определяться из соотношений:

$$\begin{aligned} \xi'_n &= \frac{kA - \varepsilon}{T_3} = V_{св} - \frac{1}{T_3} \varepsilon, \\ \xi'_n &= -\frac{\varepsilon}{T_p} \end{aligned} \quad (2.43)$$

и длительность включений и отключений исполнительного механизма можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Delta t_n &= \frac{\Delta_n}{\left| V_{св} - \left( \varepsilon' + \frac{1}{T_3} \varepsilon \right) \right|}, \\ \Delta t_n &= \frac{\Delta_b}{\left| \varepsilon' + \frac{1}{T_p} \varepsilon \right|}, \end{aligned} \quad (2.44)$$



где  $V_{св}$  — обобщенный параметр обратной связи — скорость связи.

При этом период повторения импульсов (т. е. период автоколебаний) определяется соотношением

$$T = \Delta t_n + \Delta t_{п} = \Delta t_n \frac{V_{св} + \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s}\right) \varepsilon}{\varepsilon' + \frac{1}{T_p} \varepsilon},$$

а скважность импульсов  $\gamma$  соотношением

$$\gamma = \frac{\Delta t_n}{T} = \frac{1}{V_{св} + B} \left( \varepsilon' + \frac{1}{T_p} \varepsilon \right), \quad (2.45)$$

где

$$B = \left( \frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) \varepsilon. \quad (2.46)$$

Тогда, в соответствии с (2.15) получаем в целом для структуры рис. 2.12 следующую зависимость между входным сигналом  $\varepsilon$  и средним за период повторения импульсов  $T$  значением скорости  $\bar{\mu}'$ :

$$\bar{\mu}' = S\gamma = \frac{S}{V_{св} + B} \left( \varepsilon' + \frac{1}{T_p} \varepsilon \right) \quad (2.47)$$

или

$$\bar{\mu}' = \frac{S}{V_{св} + B} \left( \varepsilon + \frac{1}{T_p} \int_0^t \varepsilon dt \right). \quad (2.48)$$

Очевидно, при малых  $B \rightarrow 0$  соотношение (2.48) соответствует идеальному ПИ-алгоритму (2.7) с параметрами настройки

$$K_p = \frac{S}{V_{св}} = \frac{ST_s}{kA}; \quad T_n = T_p. \quad (2.49)$$

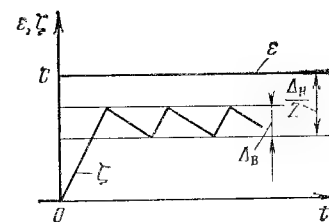
При включении в обратную связь более простого линейного апериодического звена будем иметь  $T_s = T_p$ . При этом получаем из (2.49), что параметр  $K_p$  будет связан с параметром  $T_n$ . Связанное с этим усложнение процесса настройки регулятора и приводит к необходимости применения нелинейной обратной связи с  $T_s \neq T_p$ .

*Реакция релейно-импульсного регулятора на ступенчатое воздействие*

Релейно-импульсный регулятор реализует алгоритмы (2.5), (2.7) приближенно даже в идеальном случае,

Рис. 2.16. Реакция релейно-импульсного регулятора с ПИ-алгоритмом на ступенчатое воздействие.

1 — изменение выхода релейно-импульсного регулятора; 2 — идеальный переходный процесс;  $\varepsilon$  — вход регулятора;  $\zeta$  — сигнал на выходе ОС;  $z$  — пусковые импульсы;  $\mu$  — выход исполнительного механизма.



когда характеристики релейного усилителя, обратной связи и исполнительного механизма точно соответствуют соотношениям (2.36), (2.37) и рис. 2.6 и 2.13. Несоответствие релейно-импульсного регулятора алгоритму (2.7) можно наглядно показать при сопоставлении реальной реакции такого регулятора на ступенчатое воздействие  $\varepsilon = c \cdot 1(t)$  с расчетным переходным процессом:

$$\mu(t) = K_p c + \frac{K_p}{T_n} ct \quad (\text{при } t \geq 0), \quad (2.50)$$

соответствующим идеальному ПИ-алгоритму (рис. 2.16). Как следует из (2.50), при точной реализации ПИ-алгоритма в момент  $t=0$  имеем скачкообразное изменение выхода регулятора:

$$\Delta \mu_0 = K_p c, \quad (2.51)$$

а далее при  $t > 0$  — равномерное изменение выхода со скоростью

$$\bar{\mu}' = \frac{K_p}{T_n} c. \quad (2.52)$$

Соответственно, в момент  $t = T_n$  получаем:

$$\mu|_{t=T_n} = 2K_p c = 2\Delta \mu_0. \quad (2.53)$$

При ступенчатом изменении сигнала  $\varepsilon$  на входе релейно-импульсного регулятора увеличивается скачком и сигнал на входе релейного усилителя. Такое изменение при  $c > \Delta_n/2$  приводит к включению сигнала  $z = A$  на выходе релейного усилителя, к включению двигателя исполнительного механизма и к появлению на входе

обратной связи сигнала  $kA$ . Как следует из (2.36), (2.38), скорость нарастания сигнала на выходе обратной связи в начальный момент при  $\zeta \approx 0$  равна:

$$\zeta'_0 = \frac{kA}{T_s} = V_{св}. \quad (2.54)$$

Если  $kA \gg c$ , то сигнал обратной связи  $\zeta$  компенсирует входной сигнал  $\varepsilon = c$  за время

$$\Delta t_b \approx \frac{c}{V_{св}}. \quad (2.55)$$

В течение этого времени замкнутая структура «релейный усилитель — обратная связь» работает в неавтоколебательном режиме, а регулятор работает в нелинейном режиме постоянной скорости, так как двигатель исполнительного механизма все время  $\Delta t_b$  включен.

После того как обратная связь компенсирует изменение входа, сигнал  $z$  на выходе релейного усилителя отключится, двигатель исполнительного механизма остановится и исчезнет сигнал на входе обратной связи. Это вызовет уменьшение ее выхода  $\zeta$  и соответственно увеличение входа  $\sigma$  релейного усилителя. Однако эти изменения уже не могут быть большими; здесь  $\varepsilon' = 0$ , а при  $\varepsilon' < \zeta'$  сигнал на входе релейного усилителя меняется только в пределах зоны возврата  $\Delta_b$ .

Увеличение входа  $\sigma$  релейного усилителя вызовет вновь включение сигнала  $z = A$  на его выходе. Тогда вновь появится сигнал  $kA$  на входе обратной связи, и вновь сигнал  $\zeta$  на ее выходе вызовет уменьшение  $\sigma$  и отключение выхода  $z$ . Далее релейно-импульсный регулятор будет работать в расчетном автоколебательном режиме, обеспечивающем выполнение условия реализации предельной системы (2.17) и достаточно точную реализацию ПИ-алгоритма. При этом согласно (2.47), (2.49) средняя скорость  $\bar{\mu}'$  выхода регулятора будет

$$\bar{\mu}' = \frac{K_p}{T_n} c, \quad (2.56)$$

что соответствует соотношению (2.52) для идеального ПИ-алгоритма.

Таким образом, получаем довольно точное (но только в среднем и при малых периодах повторения импульсов  $T$ ) соответствие реакции релейно-импульсного регулятора на ступенчатое воздействие идеальным соотно-

шениям (2.50) при повторных включениях и очевидные расхождения на начальном участке при первом включении исполнительного механизма. Эти расхождения требуют известной осторожности при оценках параметров релейно-импульсного регулятора по его реакциям на ступенчатый входной сигнал.

Так, по этим реакциям можно в соответствии с (2.55) довольно точно оценить значение  $V_{св}$  из соотношения

$$\Delta \mu (\Delta t_b) = S \Delta t_b = \frac{S}{V_{св}} c. \quad (2.57)$$

Отсюда же, в соответствии с (2.49), можно перейти и к теоретическому значению  $K_p$ . Однако соотношение (2.49) получено при допущениях и, в частности, при условиях (2.40), (2.42), и изменение значения  $K_p$  для анализа замкнутых АСР может быть корректным лишь в тех (не столь уж частых) случаях, когда условия (2.40), (2.42) гарантированно выполняются. Попутно отметим, что использование для тех же целей соотношения (2.51), где  $\Delta \mu_0$  определяется по интерполяции прямой линии, аппроксимирующей изменения  $\mu$  в автоколебательном режиме (при  $t > \Delta t_b$ ) на начальный участок, приводит к завышенным по сравнению с (2.57) оценкам  $V_{св}$  и соответственно к заниженным оценкам  $K_p$ .

Аналогично, в соответствии с (2.47), можно оценить значения  $\frac{S}{V_{св}} \frac{1}{T_p}$  из

$$\bar{\mu}' = \frac{S}{V_{св}} \frac{c}{T_p}. \quad (2.58)$$

и отсюда, с учетом (2.49), рассчитать  $T_n = T_p$  или при заданном  $T_n$  определить  $K_p$ .

Однако и эти значения  $T_n$  и  $K_p$  будут корректными лишь при работе релейно-импульсного регулятора в рамках условий (2.40), (2.42).

## 2.4. Нелинейные свойства и режимы работы релейно-импульсного регулятора

Релейно-импульсный регулятор построен на нелинейных элементах, таких как релейный усилитель, нелинейная обратная связь, исполнительный механизм постоянной скорости. Поэтому даже при идеальном соответствии реальных характеристик его отдельных элементов принятым выше на рис. 2.6, 2.13 и в соотношениях (2.36), (2.37), характеристики такого регулятора в целом будут достаточно близки к линейному ПИ-алгоритму лишь при выполнении ряда условий и ограничений.

Рассмотрим условия работы релейно-импульсного регулятора с обратной связью (2.36), (2.37) в линейных

режимах и нелинейные алгоритмы и режимы, возникающие при нарушении условий линейности.

#### Работа регулятора в нелинейном режиме постоянной скорости

В соответствии с (2.17) условия реализации предельной системы есть условия малости сигнала  $\sigma$  на входе релейного усилителя. Такие условия можно записать в виде двух неравенств:

$$|\sigma| \leq \frac{\Delta_n}{2}, \quad (2.59)$$

$$\Delta_n \ll \varepsilon \text{ (или } \Delta_n \rightarrow 0). \quad (2.60)$$

Малые значения сигнала  $\sigma$  могут иметь место только при быстрой и эффективной компенсации изменений входного сигнала  $\varepsilon$  сигналом обратной связи  $\zeta$ . Но величина и скорость изменения сигнала обратной связи ограничены. Поэтому превышение входным сигналом  $\varepsilon$  и его производной  $\varepsilon'$  максимально возможных значений  $\zeta$  и  $\zeta'$ , т. е. нарушение неравенств:

$$\left. \begin{aligned} |\varepsilon| &< |\zeta|_{\max}, \\ |\varepsilon'| &< |\zeta'|_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.61)$$

влечет за собой и нарушение условия предельной системы.

Максимальное значение сигнала  $\zeta$  на выходе обратной связи не может быть больше значения  $kA$ . Максимальное значение производной  $\zeta'$  определяется соотношением (2.43).

Поэтому, с учетом (2.54), можем записать следующие обеспечивающие реализацию предельной системы ограничения на величину и скорость изменения входного сигнала

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{\varepsilon}{T_s} \right| &< V_{св}, \\ |\varepsilon'| &< V_{св} - \frac{\varepsilon}{T_s}. \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

Соотношения (2.62) являются одновременно и ограничениями на допустимые диапазоны изменения входного сигнала регулятора  $\varepsilon$  и его скорости  $\varepsilon'$ , при которых характеристики релейно-импульсного регулятора соответствуют ПИ-алгоритму. При выходе сигнала  $\varepsilon$  или его скорости за пределы (2.62) сигнал обратной связи  $\zeta$  не сможет компенсировать входной сигнал. Поэтому сигнал  $\sigma$  на входе релейного усилителя выйдет за пределы зоны нечувствительности, и на выходе усилителя появится сигнал  $z=A$ , длительность включения  $\Delta t_v$  которого будет определяться длительностью нарушения (2.62) и параметрами обратной связи.

На интервале  $\Delta t_v$  двигатель исполнительного механизма включен и его выходной сигнал  $\mu$  изменяется с постоянной скоростью  $\mu' = S$  (если только  $\mu$  не достигло своего максимального  $\mu_{\max}$  или минимального  $\mu_{\min}$  значения). При существенных нарушениях (2.62), т. е. при больших интервалах  $\Delta t_v$ , скорость изменения  $\mu$  постоянна и, следовательно, не зависит от скорости  $\varepsilon'$  даже в среднем. Соответственно даже в среднем не выполняются и линейные соотношения (2.47), (2.48). Будем называть такой нелинейный ре-

жим работы релейно-импульсного регулятора режимом постоянной скорости.

Вариантом такого режима является, в частности, начальный участок реакции релейно-импульсного регулятора на ступенчатое возмущение (см. рис. 2.16); где нарушение линейного режима связано с существенным нарушением ограничений скорости  $\varepsilon'$  в начальный момент времени, где  $\varepsilon' \rightarrow \infty$ .

Работа релейно-импульсного регулятора в режиме постоянной скорости — это работа на пределе возможностей исполнительного механизма по скорости, когда в соответствии с линейным ПИ-алгоритмом выходной сигнал регулятора должен был бы изменяться со скоростью большей, чем  $S$ .

Поэтому работа в режиме постоянной скорости означает фактически снижение быстродействия и эффективности системы регулирования и недоиспользование ее возможностей. Соответственно не следует допускать слишком частую работу автоматической системы регулирования в таких режимах.

Исключение режимов постоянной скорости может быть достигнуто путем выбора исполнительного механизма с большим значением скорости  $S$ . Естественно, такое решение задачи может иметь место лишь в том случае, если скорость изменения параметра  $\mu$  не ограничена какими-либо другими (например, технологическими) соображениями. Как показывает анализ (2.62), возникновение режимов постоянной скорости определяется соотношением  $\varepsilon$  и  $V_{св}$  и не зависит непосредственно от  $S$ . Но переход к исполнительному механизму с большей скоростью делает возможным, в соответствии с (2.49), и увеличение скорости связи  $V_{св}$  (при том же значении коэффициента передачи регулятора  $K_p$ ). Увеличение  $V_{св}$  означает, в соответствии с (2.62), расширение диапазона допустимых для линейной работы релейно-импульсного регулятора скоростей изменения входного сигнала.

#### Работа регулятора в нелинейном режиме с переменным $K_p$

Наличие нелинейной обратной связи (с различными постоянными  $T_v$ ,  $T_p$  при увеличении и уменьшении сигнала обратной связи) — еще одна причина отклонения динамических свойств релейно-импульсного регулятора от линейных. В соответствии с (2.46), (2.48) коэффициент передачи релейно-импульсного регулятора  $K_p$  зависит от значения входного сигнала  $\varepsilon$ :

$$K_p = \frac{S}{V_{св} + B(\varepsilon)}. \quad (2.63)$$

Условием независимости  $K_p$  от входного сигнала является малость  $B(\varepsilon)$ :

$$B(\varepsilon) \ll V_{св}.$$

В соответствии с (2.46) это условие может быть выполнено только при

$$|\varepsilon| \ll V_{св} \frac{T_s T_p}{T_s - T_p}. \quad (2.64)$$

При близких значениях  $T_v$ ,  $T_p$ , когда

$$T_s \approx T_p, \quad (2.65)$$

динамика обратной связи близка к линейной и зависимость коэффициента передачи от входного сигнала исчезает. В этом случае

динамика регулятора также близка к линейной, независимо от значений входного сигнала  $\varepsilon$ . В противном случае динамика регулятора становится близкой к линейной только при малых значениях  $|\varepsilon|$ .

При  $T_p > T_a$  величина  $B(\varepsilon)$  становится отрицательной и с ростом  $|\varepsilon|$  коэффициент передачи регулятора увеличивается. При  $T_a > T_p$ , наоборот, величина  $B(\varepsilon)$  становится положительной и с ростом  $|\varepsilon|$  величина коэффициента передачи регулятора падает. В целом, уменьшение  $K_p$  с ростом  $|\varepsilon|$  является отрицательным явлением и приводит к снижению эффективности действия регулятора, качества регулирования как раз в тех случаях, когда регулятор и так выполняет свою задачу недостаточно хорошо.

Однако следует иметь в виду, что отрицательные значения  $B(\varepsilon)$  характерны в основном для АСР с малоинерционными объектами (при малом времени запаздывания объекта величина  $T_p = T_a$  будет соответствовать малой и может оказаться меньше, чем  $T_a$ ). Однако при этом обычно имеет место достаточно высокое качество регулирования и, следовательно, в среднем малые отклонения  $\varepsilon$ . Другими словами, существенное отрицательное влияние нелинейности обратной связи на качество регулирования не является типичным.

#### Нелинейные высокочастотные автоколебания в пределах зоны нечувствительности

На рис. 2.15, рис. 2.16 представлен характер автоколебаний, возникающих в идеальном релейно-импульсном регуляторе, динамика обратной связи в котором точно соответствует соотношениям (2.36), (2.37). При этом в режиме автоколебаний изменения сигнала  $\sigma$  на входе в релейный усилитель ограничены зоной возврата  $\Delta_n$ .

Однако реально в контуре обратной связи могут присутствовать паразитные емкости, повышающие порядок дифференциальных уравнений обратной связи и вызывающие некоторое запаздывание изменений ее выходного сигнала при включении сигнала  $z$  на выходе релейного усилителя. Связанные с этим количественно малые искажения процессов на выходе обратной связи могут приводить (при малых значениях зоны нечувствительности  $\Delta_n$ ) к качественным изменениям характера автоколебаний и нарушению нормального режима работы релейно-импульсного регулятора.

Так, в случае ступенчатого изменения сигнала на входе реального регулятора будем вначале иметь (рис. 2.17, кривая 1) лишь незначительное запаздывание сигнала обратной связи  $\xi$  и, вследствие этого, незначительное увеличение длительности первого импульса ( $\Delta t_n^*$  на рис. 2.17 больше, чем  $\Delta t_n$  на рис. 2.16). В момент  $\Delta t_n^*$  сигнал  $z=A$  на выходе релейного усилителя отключается, но выход обратной связи будет все еще увеличиваться по инерции. В связи с этим величина  $\sigma$  на входе релейного усилителя будет еще некоторое время уменьшаться. Если такой выбег  $\xi$  не приведет к выходу  $\sigma$  за пределы зоны нечувствительности (в левой отрицательной части характеристики рис. 2.13), то в дальнейшем уменьшение сигнала  $\xi$  вызовет рост  $\sigma$  и повторное включение  $z=A$ , но после несколько затянувшейся паузы  $\Delta t_n$ . Далее замкнутый контур с релейным усилителем войдет в режим автоколебаний вида рис. 2.16, но с несколько увеличенными по сравнению с (2.44) дли-

телями импульсов и пауз, а регулятор в целом сохранит свою работоспособность.

Однако при малой зоне нечувствительности  $\Delta_n$  и большой скорости изменения сигнала обратной связи (т. е. при выполнении  $V_{св} \Delta t > \Delta_n$ ) выбег сигнала  $\sigma$  может выйти за пределы  $\Delta_n$  и на выходе релейного усилителя появится сигнал  $z$  обратного знака (т. е.  $z=-A$ ). Такое обратное включение сигнала  $z$  вызовет резкое уменьшение сигнала обратной связи  $\xi$  и аналогичный выбег сигнала  $\sigma$ , но уже в противоположную сторону.

Далее процесс разнотипных переключений выхода релейного усилителя  $z(\pm A)$  становится автогенераторным, и возникающие высокочастотные автоколебания (рис. 2.17, кривая 2) фактически выводят регулятор из работоспособного состояния.

При этом первоначально нарушается лишь функциональная работоспособность регулятора (т. е. взаимосвязь между входом и выходом не соответствует ПИ-алгоритму).

При длительной работе в режиме высокочастотных автоколебаний следует и аппаратный отказ какого-либо элемента регулятора (в первую очередь, исполнительного механизма). Поэтому надо стремиться к исключению таких режимов. Достичь срыва высокочастотных автоколебаний можно либо за счет увеличения зоны нечувствительности  $\Delta_n$ , либо за счет уменьшения скорости связи  $V_{св}$ , либо, наконец, за счет полного выключения обратной связи. Однако две последние рекомендации являются, безусловно, правильными и допустимыми лишь для отключенного от объекта регулятора.

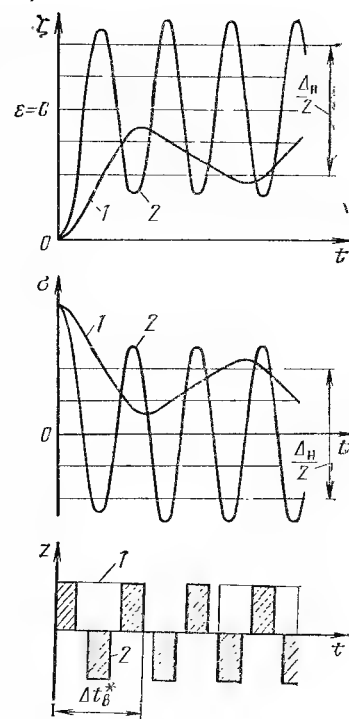


Рис. 2.17. Высокочастотные автоколебания релейно-импульсного регулятора в пределах зоны нечувствительности.

#### Низкочастотные автоколебания в пределах зоны нечувствительности

Возможность автоколебательных режимов вообще характерна для замкнутых систем, содержащих релейный элемент с характеристикой рис. 2.13.

В системе регулирования (см. рис. 2.1) наряду с рассмотренными высокочастотными могут возникать и относительно низкочастотные автоколебания, генерируемые замкнутым контуром «релейно-импульсный регулятор — объект». Поясним специфику таких автоколебаний на простейшем примере.

Пусть объект регулирования имеет характеристику апериодического звена с параметрами  $T_{об}$ ,  $K_{об}$ . В процессе регулирования на входе регулятора сигнал  $\varepsilon$  медленно приближается к границе зоны  $\Delta_n$  и значения  $\varepsilon$  и производной  $\varepsilon'$  близки к нулю. Тогда, в соответствии с (2.44), длительность импульсов на выходе регулирующего блока будет:

$$\Delta t_n^{мин} = \Delta_n / V_{св}. \quad (2.66)$$

Эта минимальная длительность импульсов, которую может обеспечить регулирующий блок при заданных настройках зоны возврата  $\Delta_n$  и скорости связи  $V_{св}$ . Поэтому под действием очередного импульса исполнительный механизм может изменить регулирующее воздействие  $\mu$  лишь на минимальную величину:

$$\Delta \mu^{мин} = S \Delta t_n^{мин}. \quad (2.67)$$

Такое изменение  $\mu$  может оказаться больше, чем это необходимо для окончательного устранения отклонения  $\varepsilon$ . Тогда величина  $\varepsilon$  изменит знак и может вновь оказаться за пределами зоны  $\Delta_n$ , но уже с другой стороны.

Регулирующий блок под действием этого нового отклонения  $\varepsilon$  вновь включает исполнительный механизм, но уже в противоположном направлении. Так как длительность этого встречного движения исполнительного механизма будет опять-таки не менее  $\Delta t_n^{мин}$ , а изменение  $\mu$  не менее  $\Delta \mu^{мин}$ , то и это воздействие окажется больше требуемого;  $\varepsilon$  вновь выйдет за пределы  $\Delta_n$ . Далее генерации знакопеременных импульсов на выходе регулирующего блока, встречных изменений регулирующего воздействия  $\pm \Delta \mu^{мин}$  и колебания входного сигнала  $\varepsilon$  в пределах зоны  $\Delta_n$  будут повторяться.

Для срыва таких автоколебаний следует либо увеличивать зону нечувствительности  $\Delta_n$ , либо уменьшать длительность импульсов  $\Delta t_n^{мин}$  (воздействуя на  $\Delta_n$  или на  $V_{св}$ ). Для данного простейшего случая можно записать следующее условие срыва низкочастотных автоколебаний

$$\Delta \mu^{мин} K_{об} = S \Delta t_n^{мин} K_{об} < \Delta_n. \quad (2.68)$$

Отсюда следует, что для срыва автоколебания необходимо выполнить условие

$$\Delta t_n^{мин} < \frac{\Delta_n}{S K_{об}}, \text{ или } K_p K_{об} < \frac{\Delta_n}{V_{св} \Delta t_n^{мин}}.$$

Однако в общем случае (например, при наличии заметного транспортного запаздывания в каналах объекта) условие (2.68) может оказаться недостаточным.

## Глава третья

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

#### 3.1. Краткая характеристика электрических средств регулирования

Электрические средства автоматического регулирования широко используются в энергетике, металлургии, химии и других отраслях народного хозяйства. Их основными достоинствами (по сравнению с пневматическими и гидравлическими средствами) являются простота энергоснабжения, возможность преобразования регулируемых величин различной физической природы в электрический сигнал и передачи его на значительные расстояния, возможность формирования разнообразных алгоритмов функционирования с широким диапазоном изменения параметров настройки, удобство централизации управления, возможность построения сложных систем, в том числе многоуровневых систем управления с использованием ЭВМ и др.

За время от выпуска первых универсальных электрических регуляторов произошли значительные изменения в элементной базе, конструктивном исполнении, функциональном составе, технических характеристиках и сигналах связи. Эти изменения отразились в смене нескольких поколений средств автоматизации.

Первое поколение средств автоматизации характеризуется применением электронных ламп для усиления и преобразования сигналов и использованием индивидуальных измерительных преобразователей с естественными (неунифицированными) сигналами связи.

Второе поколение отличается применением полупроводниковых элементов и переходом к блочно-модульному принципу конструирования приборов с унификацией корпусов отдельных блоков и преимущественным использованием унифицированных сигналов связи (главным образом токового сигнала 0—5 мА). Ко второму поколению относятся аппаратура серии РП-2 Чебоксарского завода электрических исполнительных механизмов (ЧЗЭИМ) и комплекс блоков под общим названием «Каскад» Московского завода тепловой автоматики (МЗТА).

Третье поколение характеризуется использованием в качестве основной элементной базы интегральных микросхем. К этому поколению относятся агрегатный комплекс электрических средств регулирования (АКЭСР), выпускаемый Ивано-Франковским приборостроительным заводом.

Наибольшее распространение в энергетике и ряде других отраслей промышленности среди технических средств автоматизации первого поколения получила аппаратура МЗТА. В процессе выпуска эта аппаратура несколько раз модернизировалась. Последняя модернизация, относящаяся к первому поколению средств автоматизации, связана с выпуском комплекса средств, получившего общее наименование системы РПИБ\* по названию базового регулирующего прибора, производимого с 1965 г. В связи с широким распространением этой системы целесообразно рассмотреть ее основные характеристики.

Особенностью системы РПИБ является использование индивидуальных измерительных преобразователей с неунифицированными выходными сигналами.

При этом регулирующие приборы (релейно-импульсные РПИБ и корректирующие КПИ) выполняются в виде двух блоков, объединенных в одном корпусе: измерительного ИБ и регулирующего (электронного) РБ. Измерительные блоки являются сменными и рассчитаны на работу с определенным видом измерительных преобразователей. В системе РПИБ имеется около 10 типов измерительных блоков. Выходные сигналы блоков приведены к одному виду — напряжению постоянного тока с линейным диапазоном изменения от  $-5$  В до  $+5$  В. Благодаря этому достигается унификация регулирующих блоков. Другие виды функциональных устройств имеют встроенные (несменные) измерительные цепи и рассчитаны на работу только с одним видом входного сигнала.

Информационная подсистема АСУ ТП в этом случае имеет свои первичные измерительные преобразователи, не связанные с системой регулирования.

Основное достоинство рассматриваемой структуры комплекса средств автоматического регулирования с естественными (неунифицированными) сигналами связи — повышенные показатели по надежности. Это обеспечи-

вается благодаря минимальному числу элементов, преобразований и связей на пути от регулируемой величины до регулирующего воздействия.

Система РПИБ включает в себя комплекс средств, позволяющих решать достаточно сложные задачи автоматического регулирования теплоэнергетических процессов в стационарных режимах. По функциональному назначению в этом комплексе можно выделить четыре группы средств автоматического регулирования:

первичные измерительные преобразователи (датчики);

устройства статического и динамического преобразования информации (функциональные устройства);

устройства оперативного управления;  
исполнительные устройства.

Первичные измерительные преобразователи автоматических систем регулирования характеризуются условиями работы и предъявляемыми к ним требованиями, отличными от тех, которые имеют место для информационных систем. Датчики систем регулирования работают в более узком диапазоне (в некоторой зоне вблизи номинального значения регулируемой величины). Однако они должны обладать высокой чувствительностью (коэффициентом передачи) и быстродействием и по возможности не иметь люфтов и других видов вариаций.

Отмеченные особенности привели в свое время к разработке специальных модификаций датчиков, предназначенных только для работы в системах регулирования. В табл. 3.1 приведен перечень основных типов датчиков, наиболее часто применяемых с аппаратурой автоматического регулирования системы РПИБ.

К устройствам статического преобразования информации системы РПИБ в первую очередь относятся измерительные блоки регуляторов, выполняющие широкий круг функций: согласование входных параметров регулирующих блоков с характеристиками датчиков; масштабирование сигналов, поступающих от датчиков; формирование электрического сигнала, соответствующего заданному значению регулируемой величины с возможностью его оперативного изменения; формирование сигнала рассогласования (в виде напряжения постоянного тока с линейным диапазоном изменения от  $-5$  до  $+5$  В), а также гальваническое разделение цепей датчиков и регулирующего блока.

\* РПИБ — регулирующий прибор импульсного действия с бесконтактным выходом.

Таблица 3.1. Основные типы измерительных преобразователей, применяемых с аппаратурой системы РПИБ

| Измерительные преобразователи               | Измеряемая величина              | Выходной сигнал или параметр                                                               |
|---------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Манометр МЭД                                | Давление                         | Изменение напряжения переменного тока                                                      |
| Дифманометр ДТ-2                            | Напор, разрежение                | То же                                                                                      |
| Дифманометры: ДМ, ДММ                       | Расход, уровень                  | Изменение индуктивного сопротивления полуобмоток                                           |
| Пирометр ТЭРА-50                            | Температура                      | Изменение напряжения постоянного тока                                                      |
| Термоэлектрические термометры ТПП, ТХА, ТХК | То же                            | То же                                                                                      |
| Термометры сопротивления ТСП, ТСМ           | То же                            | Изменение активного сопротивления                                                          |
| Кислородометры: КМК-59<br>Щ-МК-Н            | Химический состав                | Изменение напряжения переменного тока<br>Изменение силы постоянного тока в пределах 0—5 мА |
| Солемер КСКВ                                | То же                            | Изменение сопротивления рабочего плеча                                                     |
| Трансформаторы: напряжения ТН, тока ДТТ-58  | Электрическая мощность           | Изменение напряжения переменного тока                                                      |
| Датчики перемещений: индуктивный            | Линейное перемещение             | Изменение индуктивного сопротивления полуобмоток                                           |
| дифференциально-трансформаторный            | То же                            | Изменение напряжения переменного тока                                                      |
| реостатный                                  | Линейное или угловое перемещение | Изменение активного сопротивления рабочих плеч                                             |

Таблица 3.2. Основные типы измерительных блоков системы РПИБ

| Измерительный блок | Тип измерительных преобразователей                                                                                   |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| И-П-62             | Один-три преобразователя с дифференциально-трансформаторными (ДТД), индуктивными (ДИ) или реостатными (ДР) датчиками |
| И-Т-62             | Термоэлектрический термометр градуировки ХК, ХА или ПП                                                               |
| И-Т2-62            | То же плюс один-два датчика переменного тока (ДТД, ДИ или ДР)                                                        |
| И-С-62             | Термометр сопротивления ТСМ или ТСП                                                                                  |
| И-МК-62            | Магнитный кислородомер КМК-59                                                                                        |

Перечень основных измерительных блоков с указанием соответствующих измерительных преобразователей приведен в табл. 3.2.

Измерительный блок И-Т-62 содержит (рис. 3.1) входное устройство ВУ, магнитный усилитель МУ, разделительный трансформатор Тр, фазочувствительный усилитель ФУ и сглаживающий фильтр Ф.

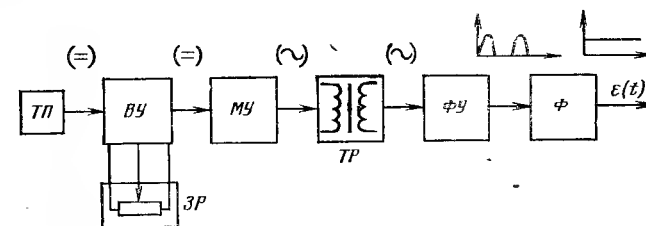


Рис. 3.1. Структурная схема измерительного блока И-Т-62.

Входное устройство воспринимает сигнал от термопары ТП и выносного ручного задатчика ЗР и вырабатывает сигнал рассогласования в виде напряжения постоянного тока низкого уровня. Магнитный усилитель производит его усиление и преобразование в сигнал переменного тока, причем фазовый сдвиг этого сигнала относительно сетевого напряжения несет информацию о знаке сигнала рассогласования. Трансформатор Тр обеспечивает гальваническое разделение входных и выходных цепей.

Фазочувствительный усилитель производит усиление и демодуляцию сигнала, формируя однополупериодное выпрямленное напряжение, полярность которого определяется фазовым сдвигом входного сигнала относительно сетевого напряжения. С помощью сглаживающего фильтра выделяется постоянная составляющая выпрямленного сигнала, которая подается на выход измерительного



блока в виде напряжения постоянного тока  $\varepsilon(t)$  с линейным диапазоном изменения  $-5 \div 0 \div +5$  В.

Другие типы измерительных блоков отличаются от блока И-Т-62 видом входного устройства, а также тем, что могут не содержать магнитный усилитель.

Кроме измерительных блоков в системе РПИБ имеются следующие устройства статического преобразования информации:

сумматор сигналов переменного тока СП-63;  
размножитель сигналов переменного тока РП-63;  
переключатели ламповые с контактным выходом ПЛК-Т (для работы с термоэлектрическим термометром) и ПЛК-П (для работы с датчиками переменного тока), которые используются для сигнализации предельных значений параметров, а также для синхронизации хода двух исполнительных механизмов (ПЛК-П).

К устройствам динамического преобразования относятся в первую очередь релейно-импульсные и аналоговые регулирующие блоки, объединяемые в общем корпусе с одним из измерительных блоков. Конструкция, содержащая измерительных и релейно-импульсных блоки, получила название регулирующей прибор. Сочетание измерительного и аналогового регулирующего блоков называется корректирующим прибором.

Регулирующие приборы предназначены для формирования ПИ-закона регулирования в комплекте с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости.

Корректирующие приборы используются в каскадных системах регулирования и реализуют также ПИ-закон.

В составе рассматриваемого комплекса средств автоматического регулирования имеются регулирующие приборы серии РПИБ (регулирующие приборы импульсные с бесконтактным выходом) и корректирующие приборы серии КПИ (корректирующие приборы пропорционально-интегральные).

Релейно-импульсный регулирующей блок РПИ-62, входящий в состав регулирующего прибора РПИБ, содержит (рис. 3.2) суммирующий каскад СК, корректор Кор, модулятор М, дифференцирующую цепь ДФ, триггер Т; выходной каскад ВК, отрицательную обратную связь ООС, положительную обратную связь ПОС, узел трансформатора обратной связи ТОС и функциональную обратную связь ФОС.

Суммирующий каскад имеет высокое входное сопротивление (более 100 МОм), что необходимо в связи с тем, что функциональная обратная связь блока выполнена на пассивных RC-элементах и содержит высокоомные резисторы. Суммирующий каскад выполнен на электронной лампе (двойной триоде 6Н1П) по схеме балансного усилителя постоянного тока. Балансировка суммирующего каскада производится корректором Кор.

Модулятор выполнен в виде транзисторного ключа, управляемого переменным напряжением с частотой питающей сети 50 Гц. Сигнал на выходе модулятора представляет собой последовательность импульсов, близких к прямоугольным, амплитуда которых пропорциональна уровню входного сигнала.

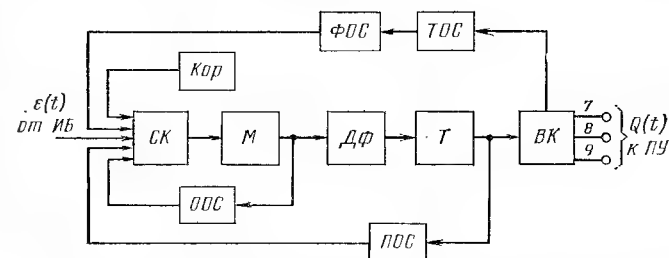


Рис. 3.2. Структурная схема релейно-импульсного регулирующего блока системы РПИБ.

Триггер, являясь элементом с двумя устойчивыми состояниями, обеспечивает формирование требуемой релейной характеристики прямого канала регулирующего блока. Он выполнен на двух транзисторах и одном трансформаторе. Триггер управляется импульсами, формируемыми дифференцирующей CR-цепочкой ДФ из сигнала, поступающего с выхода модулятора. Когда уровень управляющих импульсов превысит порог срабатывания триггера, он начинает переключаться с частотой питающего напряжения, формируя на своем выходе прямоугольные колебания с постоянной амплитудой и фазой, зависящей от знака сигнала рассогласования.

Выходной каскад выполняет функцию фазочувствительного усилителя мощности. Он воспринимает колебания с выхода триггера и выдает командный сигнал  $Q(t)$  в виде пульсирующего выпрямленного напряжения 24 В на соответствующую пару зажимов трехпроводной линии связи для управления пусковым устройством ПУ исполнительного механизма (на зажимы 7 и 8 при включении в сторону «Меньше» и на зажимы 8 и 9 при срабатывании в направлении «Больше»).

Отрицательная и положительная обратные связи представляют собой пропорциональные звенья с регулируемыми коэффициентами передачи, причем звено ООС служит для изменения зоны нечувствительности регулирующего блока, а звено ПОС — для изменения минимальной длительности его выходных импульсов.

Функциональная обратная связь, определяющая алгоритм функционирования всего регулятора, выполнена (с целью обеспечения независимости органов настройки параметров  $K_p$  и  $T_n$ ) в виде не-

линейного аperiodического RC-звена с разделением цепей заряда и разряда с помощью неоновой лампы.

Напряжение, поступающее на вход функциональной обратной связи, формируется с помощью узла трансформатора обратной связи ТОС в виде последовательности кратковременных импульсов, что позволяет получить требуемые скорости сигнала обратной связи  $V_{св}$  при не слишком больших сопротивлениях резисторов зарядной цепи.

К устройствам динамического преобразования относятся также дифференциаторы ламповые ДЛТ (для работы с термоэлектрическими термометрами) и ДЛП (для работы с датчиками переменного тока).

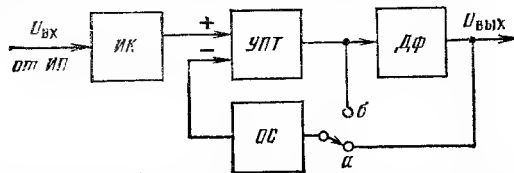


Рис. 3.3. Структура дифференциаторов ДЛТ и ДЛП.

Дифференциаторы имеют передаточную функцию реального дифференцирующего звена и используются в каскадных схемах с исчезающим сигналом из промежуточной точки, в схемах с компенсацией возмущений, для формирования дифференциальной составляющей ПИД-закона регулирования и др.

Дифференциаторы ДЛТ и ДЛП (рис. 3.3) содержат измерительный каскад ИК с коэффициентом передачи  $K_{и.к}$ , различный для ДЛТ и ДЛП, ламповый усилитель постоянного тока УПТ с коэффициентом усиления  $K_y \approx 20$ , дифференцирующую СК-цепь Дф и цепь обратной связи ОС с коэффициентом передачи  $K_{о.с.}$ , для включения которой существует несколько различных вариантов.

Передаточная функция дифференцирующей цепочки имеет вид:

$$W_{дф}(p) = \frac{T_{дф}p}{T_{дф}p + 1},$$

причем  $T_{дф}$  может изменяться в пределах от 0 до 30 с.

При включении дифференциатора с отрицательной обратной связью, охватывающей СК-цепь, общая передаточная функция дифференциатора  $W_d(p)$  приобретает следующий вид:

$$W_d(p) = K_{и.к} \frac{K_y}{K_y K_{о.с.} + 1} \frac{T_{дф} (K_y K_{о.с.} + 1) p}{T_{дф} (K_y K_{о.с.} + 1) p + 1}$$

или

$$W_d(p) = K_d \frac{T_{дф}}{T_{дф}p + 1},$$

где

$$K_d = K_{и.к} \frac{K_y}{K_y K_{о.с.} + 1}; \quad T_d = (K_y K_{о.с.} + 1) T_{дф}.$$

В группу устройств динамического преобразования информации входит также комплект динамических связей КДС, который реализует передаточную функцию аperiodического звена. Это устройство используется в качестве звена компенсации между отдельными контурами регулирования, связанными через объект. Например, устройство устанавливается в системах регулирования энергоблоков ТЭС между выходом релейно-импульсного регулирующего блока регулятора воздуха и входом регулятора разрежения, для того чтобы уменьшить отклонение разрежения при срабатывании регулятора воздуха.

Группу устройств оперативного управления составляют блоки управления, ручные задатчики автоматических регуляторов, а также индикаторы или указатели положения исполнительных механизмов. Все эти устройства размещаются обычно на оперативном пульте управления отдельно от регулирующих приборов. Назначение этих устройств:

а) переключение цепей управления исполнительным механизмом с возможностью установки одного из трех режимов: автоматического управления исполнительным механизмом от регулирующего прибора; дистанционного управления исполнительным механизмом вручную с пульта управления; внешнего управления исполнительным механизмом;

б) включение исполнительного механизма в желаемом направлении («Меньше» — «Больше») в режиме дистанционного управления;

в) сигнализация срабатываний релейно-импульсного регулирующего прибора;

г) индикация положения исполнительного механизма, а также выходного сигнала корректирующего прибора;

д) ручное изменение задания с пульта управления.

Для релейно-импульсных регулирующих приборов РПИБ выпускались два вида блоков управления: БУ2/6

и БУ1/6. Блок управления БУ2/6 содержит следующие элементы:

переключатель на три положения для установки требуемого режима управления исполнительным механизмом;

две кнопки для ручного дистанционного управления исполнительным механизмом («Меньше»—«Больше»);

две индикаторные лампочки (красную и зеленую) для сигнализации срабатывания регулирующего прибора.

В блоке управления БУ1/6 помимо перечисленных элементов установлен потенциометрический задатчик ( $R=25\text{ Ом}$ ). В том случае, когда не представляется возможным использовать указанный встроенный задатчик, применяются выносные ручные задатчики. Все типы ручных задатчиков являются потенциометрическими и подключаются по трехпроводной схеме к измерительным блокам регулирующих или корректирующих приборов. Наиболее распространенным является задатчик типа ЗР-1, содержащий переменный резистор с сопротивлением  $25\text{ Ом}$  (как в БУ1/6). Другие типы задатчиков отличаются наличием добавочных ограничивающих резисторов (ЗР-2), установкой спаренных переменных резисторов (ЗР-3), а также номинальными сопротивлениями.

Для представления оператору информации о положении выходного вала исполнительного механизма в системе РПИБ используется индикатор положения ИПУ (унифицированный), который подключается к датчику положения, расположенному в исполнительном механизме. Индикатор ИПУ рассчитан на работу с датчиками, питаемыми переменным током (индуктивным, дифференциально-трансформаторным или реостатным), содержит измерительную ячейку, фазочувствительный выпрямитель (демодулятор) и магнитоэлектрический миллиамперметр, используемый в качестве указателя положения.

### 3.2. Исполнительные устройства электрических регуляторов

#### Общие сведения

Группу исполнительных устройств в системах управления образуют пусковые устройства и исполнительные механизмы.

Пусковые устройства обеспечивают необходимое усиление мощности управляющих сигналов, поступающих

от регулирующего блока при автоматическом регулировании или при ручном управлении от оператора. При использовании электрических исполнительных механизмов постоянной скорости управляющие сигналы носят характер импульсов с изменяющейся скважностью и одинаковой амплитудой. Это позволяет использовать для их усиления простые пусковые устройства, рассчитанные на дискретный сигнал управления.

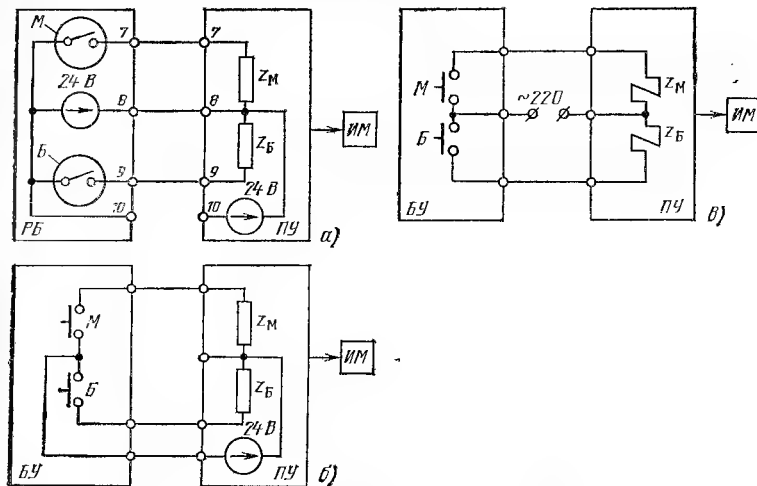


Рис. 3.4. Способы управления пусковым устройством.

Пусковые устройства могут быть контактные и бесконтактные. Каждый тип пускового устройства рассчитан на работу в комплекте с определенным типом исполнительного механизма.

Входные цепи пусковых устройств позволяют использовать обычно два вида управляющих сигналов:

активный сигнал управления в виде постоянного или пульсирующего тока напряжением  $24\text{ В}$ ;

пассивный сигнал управления в виде замыкания соответствующих входных зажимов с помощью бесконтактных или контактных ключей.

Активный сигнал используется обычно при управлении пусковым устройством ПУ от релейно-импульсных регулирующих блоков (рис. 3.4,а). Пассивный сигнал применяется в основном при ручном дистанционном управлении с помощью соответствующих кнопок или

ключей (рис. 3.4,б). Энергия, необходимая для срабатывания пускового устройства, в этом случае поступает от источника, содержащегося в самом пусковом устройстве.

Контактные пусковые устройства типа ПМРТ (МКР) допускают подключение обмоток электромагнитов к сети переменного тока 220 В, 50 Гц (рис. 3.4,в).

Для каждого из рассмотренных способов управления используется трехпроводная линия связи. Один из проводов является общим: в случае активного управляющего сигнала этот провод подключается обычно к зажиму 8 пускового устройства, в случае пассивного — к зажиму 10.

Для подачи управляющего сигнала в направлении «Меньше» используются зажимы 7 и общий (8 или 10), в направлении «Больше» — зажимы 9 и общий.

Исполнительные механизмы релейно-импульсных регуляторов должны обеспечивать перемещение регулирующего органа с постоянной скоростью в течение действия управляющих импульсов, поступающих от регулирующего блока или от оператора.

В состав электрических исполнительных механизмов обычно входят следующие элементы: асинхронный электродвигатель; редуктор; концевые и путевые выключатели; датчики положения; тормозное устройство; ручной привод.

Электродвигатель с редуктором служит для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для преодоления сопротивления среды со стороны регулирующего органа.

Концевые выключатели используются для отключения пускового устройства при достижении регулирующим органом крайних положений, т. е. выполняют защитные функции, а путевые — для ограничения диапазона перемещения регулирующего органа в автоматическом режиме.

Датчики положения формируют сигнал, пропорциональный углу поворота выходного вала исполнительного механизма. Этот сигнал подается к индикатору положения на пульте оператора, а также может использоваться в системе управления в качестве сигнала обратной связи по положению регулирующего органа и др.

Тормозные устройства устанавливаются в исполнительных механизмах для уменьшения выбега выходного

вала в процессе останова электродвигателя (после прекращения действия управляющих импульсов).

Ручной привод предусматривается в исполнительном механизме для обеспечения возможности перемещения регулирующего органа при выходе из строя пускового устройства.

Параметры сигналов связи регулирующих блоков, пусковых устройств и исполнительных механизмов стандартизованы. Поэтому один и тот же тип исполнительных устройств может использоваться с различными системами регулирующих блоков.

Ниже рассматриваются исполнительные устройства производства ЧЗЭИМ и МЗТА, применяемые в системах автоматического регулирования технологических процессов.

#### *Исполнительные механизмы типа МЭО производства ЧЗЭИМ*

Наибольшее распространение среди электрических исполнительных механизмов постоянной скорости, применяемых в составе релейно-импульсных регуляторов, получили однооборотные исполнительные механизмы типа МЭО производства Чебоксарского завода электрических исполнительных механизмов (ЧЗЭИМ).

Номинальный полный ход выходного вала в этих механизмах может быть 0,25 или 0,63 оборота. Исполнительные механизмы МЭО обозначаются по ГОСТ 7192-74, в соответствии с которым в обозначении указываются последовательно три величины:

$M_{кр}$  — номинальный крутящий момент на выходном валу, кгс·м;

$T_{н.м}$  — номинальное время полного хода выходного вала исполнительного механизма от минимума до максимума, с;

$\Phi_{н.м}$  — номинальный полный ход выходного вала исполнительного механизма, обороты.

Дополнительно может указываться год модификации (например, 68).

Исполнительные механизмы типа МЭО выпускаются в различных модификациях, для которых указанные параметры охватывают широкий диапазон значений:

$M_{кр}=4, 10, 25, 63, 160, 400$  кгс·м;

$T_{н.м}=10, 25, 63, 160$  с;

$\Phi_{н.м}=0,25; 0,63$  оборота.

Примеры обозначений исполнительных механизмов типа МЭО:

МЭО-4/10-0,25-68; МЭО-4/25-0,63-68;  
 МЭО-25/63-0,25; МЭО-25/160-0,63;  
 МЭО-63/25-0,25-68; МЭО-63/63-0,63-68;  
 МЭО-400/63-0,25; МЭО-400/160-0,63.

Механизмы типа МЭО рассчитаны на бесконтактное управление с помощью магнитных усилителей типа УМД или реверсивного тиристорного пускателя ПБР-2. Вместе с тем допускают и контактное управление с помощью магнитных пускателей МКР-0-58 или ПМРТ-69. Общий вид механизмов типа МЭО показан на рис. 3.5.

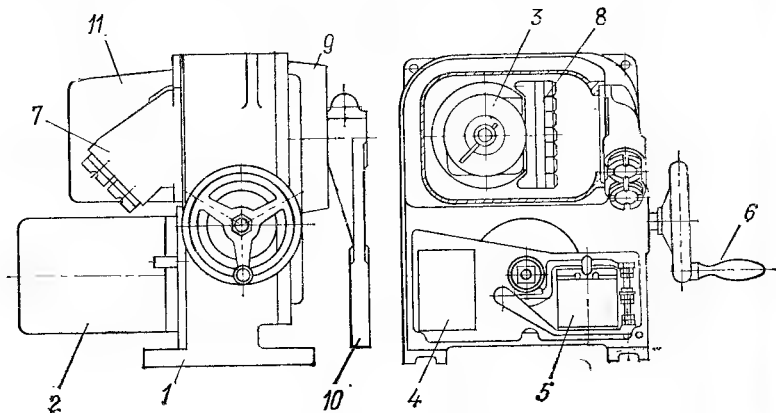


Рис. 3.5. Общий вид механизмов типа МЭО.

1 — редуктор; 2 — электродвигатель; 3 — блок датчиков; 4 — конденсатор; 5 — электромагнитный тормоз; 6 — ручной привод; 7 — штуцерный ввод; 8 — клеммная колодка; 9 — узел упоров; 10 — рычаг; 11 — крышка.

Одной из отличительных особенностей рассматриваемых исполнительных механизмов является применение в них однофазных асинхронных конденсаторных двигателей типа ДАУ. Эти двигатели отличаются малой инерционностью, высокой надежностью и способны длительно работать на упор. Последнее обстоятельство позволяет исключить из схемы управления исполнительным механизмом защитные концевые выключатели, роль которых выполняют настраиваемые механические упоры. Однофазное питание двигателя напряжением 220 В, 50 Гц также упрощает электрическую схему управления исполнительным механизмом.

Вторая особенность исполнительных механизмов типа МЭО состоит в применении многоступенчатых цилиндрических редукторов, отличающихся высоким КПД.

Благодаря этому открывается возможность применения сравнительно маломощных электродвигателей для привода исполнительных механизмов с большими крутящими моментами (до 400 кгс·м). Это в свою очередь упрощает задачу выбора пусковых устройств и способствует улучшению динамических свойств исполнительных механизмов. С другой стороны, применение цилиндрических редукторов в исполнительных механизмах сопряжено с одним существенным недостатком, связанным с тем, что цилиндрические редукторы не являются самотормозящими и не способны сами по себе удержать нагрузку на выходном валу исполнительного механизма при обесточенном электродвигателе. Поэтому рассматриваемые исполнительные механизмы требуют применения надежных тормозных устройств, стопорящих выходной вал исполнительного механизма после отключения двигателя.

Тормозное устройство исполнительных механизмов типа МЭО имеет электромагнитный привод в виде соленоида, включаемого параллельно с обмоткой управления двигателя. При обесточенном электромагните с помощью рабочей пружины обеспечивается необходимое усилие торможения.

При появлении силового напряжения на обмотке управления электродвигателя появляется ток и в обмотке соленоида. Якорь втягивается и отводит тормозную колодку от вала электродвигателя.

При исчезновении напряжения на обмотке управления двигателя соленоид

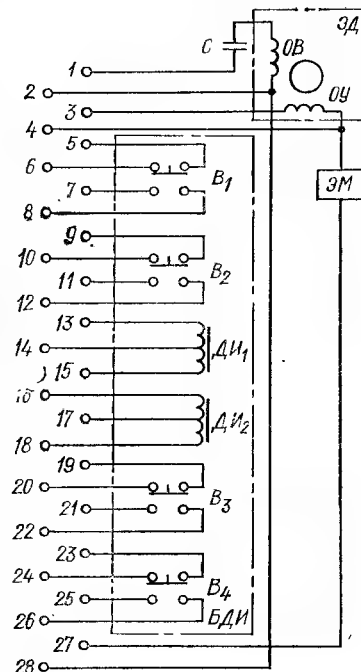


Рис. 3.6. Схема внутренних электрических соединений исполнительного механизма типа МЭО с блоком датчиком БДИ-6.

ЭД — электродвигатель; ОВ — обмотка возбуждения; ОУ — обмотка управления; ЭМ — обмотка электромагнитного тормоза; С — фазосдвигающий конденсатор; БДИ — блок датчиков индуктивных; В<sub>1</sub>, ... В<sub>4</sub> — микровыключатели; ДИ<sub>1</sub>, ДИ<sub>2</sub> — датчики положения индуктивные.

обесточивается и вал электродвигателя тормозится с помощью пружины и тормозной колодки.

Исполнительные механизмы МЭО оснащаются обычно двумя индуктивными датчиками положения. Датчики размещаются в специальном блоке датчиков БДИ-6, в котором, кроме того, расположены четыре микровыключателя с двумя независимыми цепями каждый. Плунжеры датчиков и толкатели переключателей перемещаются с помощью кулачков, связанных с выходным валом исполнительного механизма.

Схема внутренних электрических соединений исполнительного механизма МЭО с блоком датчиков БДИ-6 показана на рис. 3.6.

В механизмах МЭО могут устанавливаться и другие модификации датчиков положения: индуктивный с устройством люфт — БДИ-6Л; реостатный БДР-II; токовый типа БДТ, состоящий из блока датчиков магнитных БДМ-2 и блока усилителей БУ-2.

*Исполнительные механизмы Московского завода тепловой автоматики (МЗТА)*

Московский завод тепловой автоматики производит два вида исполнительных механизмов: типа МЭОК, рассчитанного на контактное управление от пускателя ПМРТ, и типа МЭОБ, рассчитанного на бесконтактное управление от тиристорного пускателя типа У-101. Все механизмы имеют номинальный рабочий угол поворота выходного вала  $90^\circ$  (0,25 оборота). Разновидности этих механизмов представлены в табл. 3.3. Заметим, что вторая цифра в обозначении механизмов производства МЗТА соответствует времени одного оборота выходного вала (для механизмов типа МЭО производства ЧЗЭИМ

Таблица 3.3. Исполнительные механизмы производства МЗТА

| Марка механизма | Крутящий момент, кгс-м | Время полного оборота, с | Мощность электродвигателя, кВт | Марка пускателя | Масса, кг |
|-----------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------|
| МЭОК-25/100     | 25                     | 100                      | 0,27                           | ПМРТ-69-1       | 54        |
| МЭОК-63/100     | 63                     | 100                      | 0,4                            | ПМРТ-69-2       | 130       |
| МЭОБ-25/100     | 25                     | 100                      | 0,27                           | У-101           | 54        |
| МЭОБ-63/100     | 63                     | 100                      | 0,4                            | У-101           | 130       |

указывается номинальное время полного хода выходного вала от минимума до максимума).

Исполнительные механизмы типа МЭОК состоят из двух основных частей — сервомотора типа РМ (с редуктором малой модели) или типа РБ (с редуктором большой модели) и блока сервомотора типа БС. Внешний вид исполнительных механизмов типа МЭОК показан на рис. 3.7.

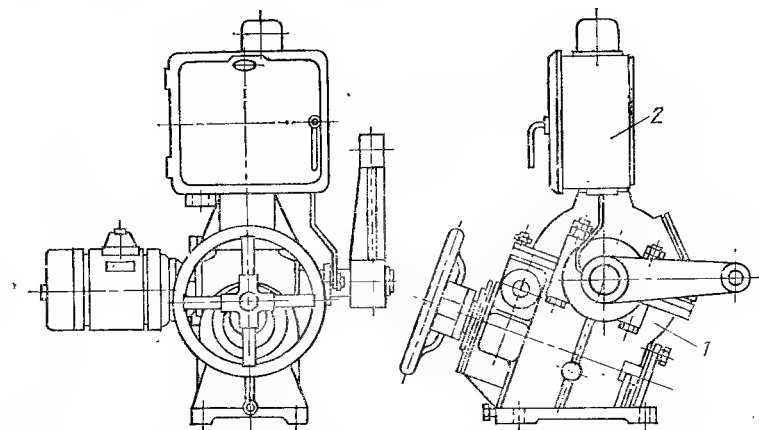


Рис. 3.7. Внешний вид механизмов типа МЭОК.

1 — сервомотор; 2 — блок сервомотора.

Сервомотор представляет собой сочетание электродвигателя и редуктора с выдвижным штурвалом ручного управления. Отличительной особенностью исполнительных механизмов производства МЗТА является применение двухступенчатых червячных редукторов, обладающих свойством самоторможения. Поэтому необходимость в стопорящем тормозном устройстве в этих исполнительных механизмах отпадает, что повышает их эксплуатационную надежность. Торможение исполнительных механизмов в этом случае играет вспомогательную роль для уменьшения выбега и выполняется электроконденсаторным способом с помощью контактов пускателя. С другой стороны, низкий КПД червячных пар вынуждает применять более мощные электродвигатели. Поэтому в исполнительных механизмах производства МЗТА устанавливаются трехфазные асинхронные электродвигатели типа

АОЛ с короткозамкнутым ротором. Эти двигатели отличаются большей инерционностью, чем однофазные двигатели типа ДАУ, что обуславливает несколько большее время разгона исполнительных механизмов МЗТА.

Все типы исполнительных механизмов МЗТА как с контактным, так и с бесконтактным управлением оснащаются блоками сервомотора типа БС, выпускаемыми в трех модификациях.

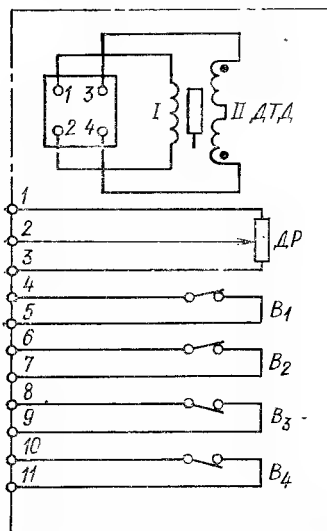


Рис. 3.8. Схема внутренних соединений блока сервомотора БС.

ДТД — дифференциально-трансформаторный датчик; ДР — датчик реостатный;  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$  — выключатели.

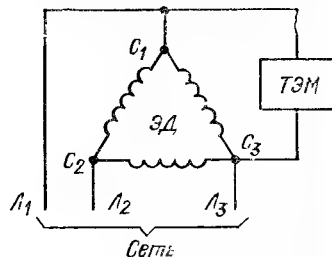


Рис. 3.9. Способы включения тормозного устройства ТЭМ в механизмах МЭОБ.

Блок сервомотора БС-1 содержит одну пару концевых выключателей  $B_1$  и  $B_4$ , используемых для ограничения предельных положений выходного вала при ручном дистанционном управлении, и одну пару путевых выключателей  $B_2$  и  $B_3$ , выполняющих ту же задачу при автоматическом регулировании, а также реостатный датчик (ДР) дистанционного указателя положения сопротивлением 250 Ом.

Блок сервомотора БС-2 помимо элементов, имеющихся в блоке БС-1, содержит дифференциально-трансформаторный датчик (ДТД) положения, используемый для введения сигнала обратной связи в систему регулирования.

Блок сервомотора БС-3 отличается от блока сервомотора БС-2 тем, что перемещение выходного вала пере-

дается к плунжеру дифференциально-трансформаторного датчика через устройство типа люфт, допускающее регулировку в пределах 20—100% от полного рабочего угла поворота выходного вала.

Все типы блоков сервомотора размещаются в одинаковых отдельных корпусах, которые устанавливаются и крепятся непосредственно на сервомоторах. Схема внутренних электрических соединений блока сервомотора показана на рис. 3.8.

Исполнительные механизмы типа МЭОБ с бесконтактным управлением содержат электрический сервомотор СЭ-25/120 или СЭ-100/120 и тот же блок сервомотора типа БС.

Сервомоторы типа СЭ отличаются от соответствующих редукторов типа РМ или РБ тем, что имеют встроенное тормозное устройство с электромагнитным приводом типа ТЭМ, соединенное через жесткую муфту с выходом вала электродвигателя с правой стороны редуктора. Обмотка электромагнита тормозного устройства рассчитана на напряжение переменного тока 220 В и подключается непосредственно в параллель к одной из обмоток электродвигателя ЭД (рис. 3.9). Таким образом, срабатывание тормозного устройства происходит одновременно с поступлением силового напряжения на электродвигатель.

## Контактные пусковые устройства

Контактные пусковые устройства из-за своей простоты и низкой стоимости получили широкое распространение. Основным из них является пускатель магнитный реверсивный с электроконденсаторным тормозным устройством типа ПМРТ-69 (рис. 3.10), который выполнен на базе магнитного реверсивного контактора МКР-0-58 и отличается от него лишь тем, что содержит встроенные электролитические конденсаторы для торможения управляемого исполнительного механизма.

Реверс электродвигателя исполнительного механизма обеспечивается изменением последовательности двух коммутируемых фаз. В качестве достоинства контактора необходимо отметить эффективную механическую блокировку от одновременного срабатывания обеих групп силовых контактов.

Более подробного рассмотрения требует принцип электроконденсаторного торможения. Тормозное устрой-



ство представляет собой электролитический конденсатор, подключаемый через размыкающие блок-контакты К1.5, К2.5 к одной из статорных обмоток электродвигателя. При замыкании любой группы силовых контактов соответствующий блок-контакт размыкается и конденсатор отключается от электродвигателя.

После размыкания силовых контактов и отключения силового напряжения выходной вал исполнительного механизма останавливается не сразу, а продолжает в течение

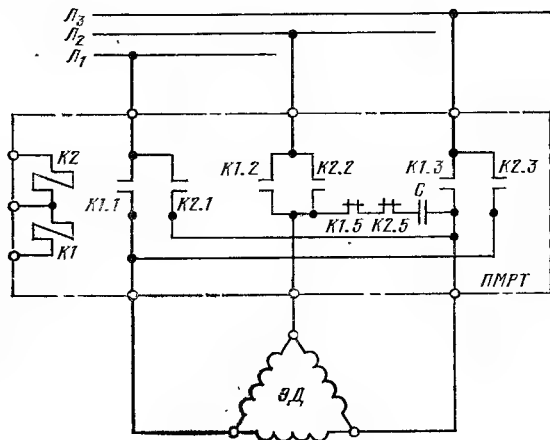


Рис. 3.10. Схема включения пускателя магнитного типа ПМРТ-69.

некоторого времени движение по инерции. Вращающийся при этом ротор электродвигателя, взаимодействуя с остаточным магнитным полем статора, наводит в его обмотках некоторую генераторную Э. Д. С.

Блок-контакты пускателя подключают к статорной обмотке электролитический конденсатор, в результате чего появляется ток, который наводит в статоре собственное магнитное поле. Взаимодействие этого поля с вращающимся ротором создает противодействующий вращению тормозной момент, препятствующий выбегу исполнительного механизма. Емкость конденсатора подбирается из условия резонанса токов в замкнутом контуре и зависит от индуктивности статорной обмотки. Так, для электродвигателя типа АОЛ мощностью 0,27 кВт емкость тормозного конденсатора при соединении обмоток статора треугольником составляет 30 мкФ, а при соеди-

нении звездой — 60 мкФ. Аналогично для двигателей мощностью 0,4 кВт емкости конденсаторов составляют 60 и 150 мкФ соответственно.

Основной недостаток контактных пусковых устройств — их невысокая надежность. Проявляется этот недостаток главным образом в залипании контактов пускателя. Радикальным средством повышения надежности исполнительных устройств является применение бесконтактных пусковых устройств, к которым относятся тиристорные пускатели и магнитные усилители.

### Тиристорный пускатель У-101

Бесконтактный тиристорный пускатель У-101 обеспечивает реверсивное управление одно- и трехфазными асинхронными электродвигателями мощностью до 1,1 кВт. В качестве силовых коммутирующих элементов в этом пускателе используются управляемые диоды Д1 — Д4 (тиристоры), открываемые при поступлении на вход пускателя управляющего напряжения. Поскольку тиристоры пропускают ток лишь в одном направлении, для коммутации переменного силового напряжения каждый тиристор включается в диагональ диодного мостика, образующего схему одного ключа. Пускатель содержит четыре тиристорных ключа, обеспечивающих реверсирование двух фаз силового напряжения. Третья фаза не коммутируется и подключается к электродвигателю через дроссель Др<sub>2</sub> (рис. 3.11).

Управление тиристорами осуществляется с помощью импульсов, формируемых двумя блокинг-генераторами, каждый из которых воздействует на соответствующую пару ключей. При отсутствии управляющего сигнала блокинг-генераторы не формируют импульсов, все ключи пускателя закрыты и электродвигатель обесточен.

Управляющее напряжение пульсирующего постоянного тока 24 В от регулирующего блока, а также при ручном дистанционном управлении поступает на входные зажимы 7—8 или 9—8, причем «+» подводится всегда к зажиму 8.

Если управляющее напряжение поступает на зажимы 7—8, то на выходе блокинг-генератора БГ<sub>1</sub> появляются чередующиеся импульсы напряжения продолжительностью около 60 мкс при частоте следования около 3 кГц. Импульсы поступают на управляющие электроды тиристоров, вызывая их открытие.

Благодаря тому, что частота управляющих импульсов блокинг-генератора значительно превышает промышленную частоту коммутируемого напряжения, открытие тиристоров происходит в самом начале каждого полупериода силового напряжения. Закрытие тиристоров происходит в конце каждого полупериода, когда силовой ток уменьшается до нуля.

При исчезновении управляющего напряжения на входе пускателя прекращается генерация импульсов в блокинг-генераторе,

вследствие чего повторного открытия тиристоров в начале очередного полупериода не происходит и управляемый электродвигатель отключается.

При поступлении входного управляющего напряжения на зажимы 9—8 срабатывает второй блокинг-генератор, включающий соответствующую пару других тиристорных ключей, обеспечивающих реверсирование последовательности фаз на управляемом электродвигателе.

Схема входных цепей пускателя построена таким образом, что при одновременном появлении управляющих сигналов на обоих входах блокинг-генераторы остаются запертыми.

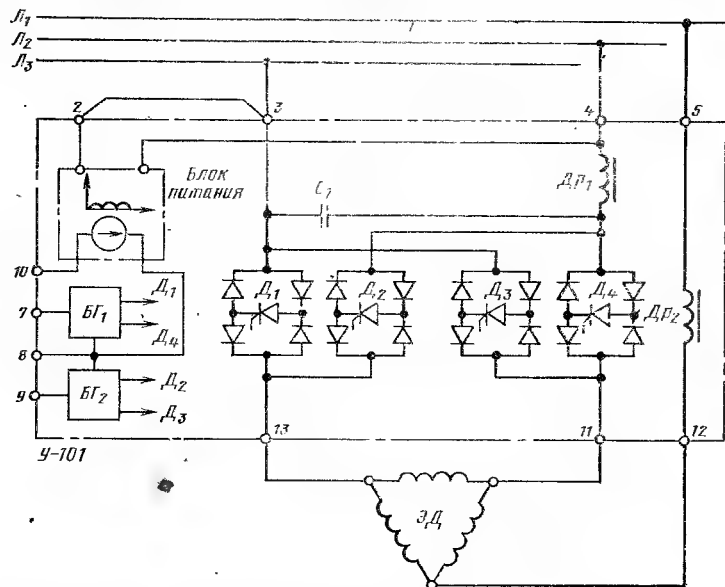


Рис. 3.11. Схема управления трехфазным электродвигателем с помощью тиристорного пускателя У-101.

Ручное дистанционное управление тиристорным пускателем осуществляется от встроенного блока питания с источником напряжения 24 В. Положительный потенциал этого источника постоянно подведен к зажиму 8, а отрицательный — выведен на зажим 10, соединение которого с помощью кнопок управления на оперативном пульте с выводами 7 или 9 обеспечивает ручное управление.

Силовой трансформатор блока питания подключается первичной обмоткой к тем же фазам, которые коммутируются тиристорными ключами. При внезапном исчезно-

вании сетевого напряжения на первичной обмотке этого трансформатора может возникнуть значительная по величине э. д. с. самоиндукции, которая окажется приложенной к тиристорам. Для защиты тиристоров от выбросов напряжения этой э. д. с. служат дроссель  $Dp_1$  и конденсатор  $C_1$ . Дроссель  $Dp_2$  ограничивает скорость нарастания напряжения на силовых электродах тиристоров.

Отсутствие блок-контактов в тиристорном пускателе не позволяет применить простейший способ электроконденсаторного торможения исполнительного механизма. Поэтому при бесконтактном управлении применяются, как правило, фрикционные тормозные устройства с электромагнитным приводом типа ТЭМ, размещаемые в исполнительных механизмах типа МЭОБ.

### Магнитные усилители типа УМД

Рассмотренные выше контактные пусковые устройства и тиристорные пускатели У-101 применяются главным образом для управления трехфазными электродвигателями. Исполнительные механизмы производства ЧЗЭИМ с однофазными электродвигателями типа ДАУ оснащались для бесконтактного управления магнитными усилителями типа УМД (рис. 3.12).

Усилитель работает по двухтактной схеме и состоит из двух дифференциально включенных однотактных усилителей, нагруженных на выходной автотрансформатор  $Tr_1$ . Выходное напряжение магнитного усилителя снимается с отводов автотрансформатора, выведенных на зажимы 3 и 4.

Каждый из однотактных усилителей содержит по два дросселя, на которые намотаны рабочие обмотки (1, 2), обмотки смещения (3, 4) и по две обмотки управления (5, 6 и 7, 8).

Питающее напряжение подводится к зажимам 1, 2 и создает токи, протекающие через обмотки дросселей и встречно направленные в обмотках автотрансформатора. При отсутствии управляющих сигналов на входе магнитного усилителя токи рабочих обмоток в силу симметрии схемы равны между собой. Поэтому результирующее напряжение на выходе магнитного усилителя близко к нулю. Рабочие точки дросселей определяются током смещения, с помощью которого задается начальный ток рабочих обмоток, равный половине его максимального значения. Постоянный ток смещения создается источником, образованным питающим трансформатором  $Tr_2$ , выпрямительными диодами  $D_1$  и  $D_2$  и регулировочными сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ .

При поступлении управляющего сигнала в виде напряжения постоянного тока 24 В на входные зажимы 8—9 магнитного усилителя появляется постоянный ток в обмотках управления дросселей; который совпадает с током смещения в одной паре дросселей и направлен навстречу ему в другой паре дросселей. В результате этого магнитная напряженность первой пары дросселей

возрастает, а второй пары уменьшается. При этом соответствующим образом изменяется и индуктивность соответствующих рабочих обмоток, вследствие чего ток рабочих обмоток в первой паре дросселей увеличивается, а во второй — уменьшается.

С помощью диодов  $D_3$ — $D_6$  направления токов в отдельных секциях рабочих обмоток фиксируются в каждый из полупериодов сетевого напряжения таким образом, что для одной пары дросселей они совпадают с направлением тока управления, а в другой — противоположны ему. Благодаря этому создается постоянное подмагничивание в каждом из дросселей со стороны рабочих обмоток. Поэтому при поступлении управляющего сигнала и изменении ра-

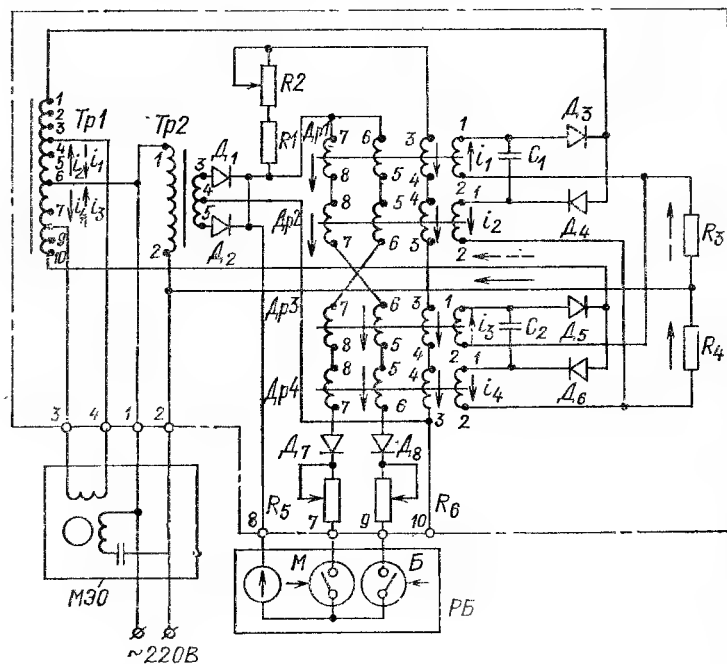


Рис. 3.12. Схема магнитного усилителя УМД.

бочих токов в ту же сторону изменяется и подмагничивание в каждом сердечнике. Тем самым в магнитном усилителе осуществляется положительная обратная связь, благодаря которой статическая характеристика усилителя имеет вид релейной характеристики.

На выходе усилителя при его срабатывании появляется переменное напряжение 220 В, 50 Гц, поступающее далее на обмотку управления однофазного асинхронного электродвигателя. Фаза этого напряжения изменяется на  $180^\circ$  при переключении управляющего сигнала с зажимов 8—9 на зажимы 7—8, что обеспечивает реверс управляемого электродвигателя.

Основными недостатками магнитных усилителей являются их большие габариты и масса. Кроме того, они имеют значительные постоянные времени. В этом отношении лучшими показателями обладают тиристорные пусковые устройства. С освоением серийного производства тиристорных пускателей ПБР-2 выпуск магнитных усилителей УМД прекращен.

### Тиристорный пускатель ПБР-2

Пускатель ПБР-2 (пускатель бесконтактный реверсивный) предназначен для работы с исполнительными механизмами МЭО, оснащенными однофазными электродвигателями с симметричными обмотками (например, МЭО-68).

Принцип управления исполнительным механизмом типа МЭО с помощью пускателя ПБР-2 поясняется схемой, приведенной на рис. 3.13.

Основу пускателя составляют два тиристорных ключа  $K_1$  и  $K_2$ , которые управляются сигналами, вырабатываемыми регулирующими блоками или оператором. Каждый из тиристорных ключей включен в цепь питания одной из статорных обмоток электродвигателя.

При отсутствии управляющих сигналов тиристорные ключи разомкнуты, обмотки электродвигателя обесточены.

При подаче управляющего сигнала «Меньше» (М) замыкается тиристорный ключ  $K_1$  и к обмотке  $O_1$  подключается источник питания (сеть 220 В, 50 Гц). К другой обмотке напряжение питания поступает через фазосдвигающий конденсатор С. Электродвигатель вращается в направлении «Меньше».

Для включения электродвигателя в противоположном направлении необходимо замкнуть тиристорный ключ  $K_2$  путем подачи управляющего сигнала «Больше» (Б). При этом к источнику питания подключается обмотка  $O_2$  непосредственно, а обмотка  $O_1$  — через фазосдвигающий конденсатор. Фазовый сдвиг между напряжениями, подведенными к обмоткам, меняет знак, в результате чего происходит реверс электродвигателя.

Таким образом, в рассматриваемой схеме нет различия в способах питания статорных обмоток  $O_1$  и  $O_2$ : каждая из них, в зависимости от требуемого направления вращения, может подключаться к источнику питания как непосредственно, так и через фазосдвигающий конденсатор. Поэтому обе статорные обмотки электродвигателя, работающего с пускателем ПБР-2, должны быть идентичны.

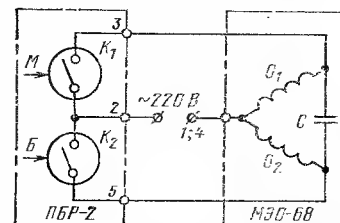


Рис. 3.13. К пояснению способа управления исполнительным механизмом с помощью пускателя ПБР-2.

При управлении исполнительными механизмами МЭО с помощью магнитных усилителей УМД статорные обмотки электродвигателей включаются различным образом. Одна обмотка (обмотка возбуждения) подключается постоянно к сети через фазосдвигающий конденсатор. Другая обмотка (обмотка управления) подключается к источнику питания непосредственно. Реверсирование электродвигателя осуществляется путем изменения на  $180^\circ$  фазы напряжения, подводимого к обмотке управления. В этом случае режимы работы обмоток имеют определенные различия, вследствие чего сами обмотки (управления и возбуждения) выполнялись неодинаковыми.

В связи с переходом от магнитных усилителей типа УМД к тиристорным пускателям ПБР-2 в конструкции исполнительных механизмов МЭО произведены соответствующие изменения. Исполнительные механизмы (модификация МЭО-68) оснащаются электродвигателями типа ДАУ с симметричными обмотками, рассчитанными на управление от пускателей ПБР-2 по рассмотренной выше схеме.

Принципиальная электрическая схема пускателя с подключенным к нему электродвигателем приведена на рис. 3.14 (для модификации пускателя ПБР-2-1, рассчитанного на управление пассивным входным сигналом).

Функцию бесконтактных ключей, осуществляющих коммутацию силовых цепей электродвигателя, выполняют симметричные тиристоры (симисторы)  $ТС_1$  и  $ТС_2$ .

Включение симисторов производится путем подачи отрицательного напряжения, вырабатываемого с помощью выпрямителей  $B_1$  и  $B_2$ . Напряжение на эти выпрямители поступает соответственно

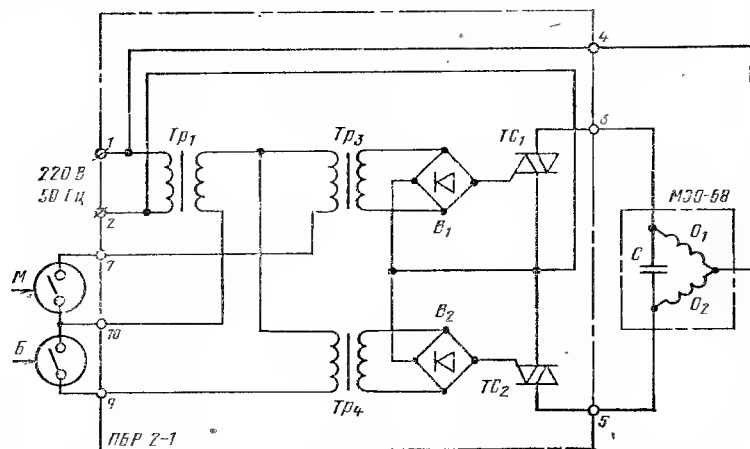


Рис. 3.14. Принципиальная электрическая схема пускателя ПБР-2-1 с подключенным исполнительным механизмом.

с разделительных трансформаторов  $Tr_3$  и  $Tr_4$  при наличии командного сигнала в виде замыкания соответствующей пары зажимов.

Замыкание зажимов 7—10 вызывает включение симистора  $ТС_1$  и соответствующее срабатывание исполнительного механизма в направлении «Меньше», а замыкание зажимов 9—10 — включение  $ТС_2$  и срабатывание механизма в направлении «Больше».

Замыкание указанных зажимов пускателя может производиться выходными ключами регулирующих блоков либо кнопками ручного дистанционного управления. Трансформатор  $Tr_1$  разделяет управляющие и силовые цепи.

Отключение симисторов происходит после снятия командного сигнала в момент перехода синусоидального тока нагрузки через нуль.

Пускатели ПБР-2 имеют три модификации:

Пускатель ПБР-2-1 рассчитан на управление пассивным входным сигналом путем замыкания соответствующих пар зажимов и не содержит выхода для электромагнитного тормоза, т. е. может применяться с исполнительными механизмами, имеющими механический тормоз.

Пускатель ПБР-2-2 отличается от пускателя ПБР-2-1 тем, что может управляться как пассивным, так и активным сигналом (0; 24 В).

Пускатель ПБР-2-3 является наиболее универсальным и может управляться пассивным и активным сигналом, и, кроме того, имеет специальный выход для управления электромагнитным тормозом исполнительного механизма МЭО-68. При любом направлении командного сигнала («Меньше» — «Больше») помимо основного силового напряжения (для включения электродвигателя) пускатель ПБР-2-3 выдает на специальный выход напряжение для срабатывания электромагнита, растормаживающего исполнительный механизм.

В пускателях ПБР-2-2 и ПБР-2-3 при использовании активного сигнала управления замыкание цепей первичных обмоток разделительных трансформаторов  $Tr_3$  и  $Tr_4$  производится с помощью дополнительных тиристорных ключей, срабатывание которых происходит при подаче управляющего напряжения 24 В.

### 3.3. Общая характеристика электрических средств автоматического регулирования ГСП

#### Общие сведения

Разработка новых технических средств автоматического регулирования производится в рамках Государст-

венной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Система ГСП подразумевает единую классификацию средств контроля и управления, унификацию входных и выходных сигналов, унификацию параметров питающих устройств, введение единого ряда требований по точности технических средств, надежности, условиям эксплуатации, а также введение единого ряда габаритных и присоединительных размеров.

Устройства ГСП строятся по блочно-модульному принципу, что позволяет создать гибкую структуру систем управления и обеспечивает независимую замену отдельных узлов и модулей.

Введение ГСП позволяет расширять и частично модернизировать системы контроля и управления, оставляя без изменения устройства системы, не подлежащие замене, сокращает типоразмеры устройств, что обеспечивает серийность изготовления основных конструктивов, блоков и модулей, а также сокращает комплект запасных частей.

Со временем ГСП должна стать по существу единственной системой средств контроля и управления. В связи с многообразием необходимых видов приборов и устройств естественно появление в рамках ГСП комплексов более узкого назначения, предназначенных для выполнения отдельных специализированных задач.

Для решения задач контроля и автоматического регулирования технологических процессов в пределах электрической ветви ГСП разработаны и серийно выпускаются комплексы технических средств «Каскад» и АКЭСР.

Комплексы обладают широкими функциональными возможностями, позволяющими строить разнообразные по сложности и структуре автоматические системы управления технологическими процессами.

Связь с измерительными преобразователями осуществляется с помощью унифицированного аналогового сигнала связи постоянного тока (преимущественно 0—5 мА). Основным достоинством токового сигнала по сравнению с сигналом напряжения является отсутствие влияния сопротивления линии связи  $R_{\text{л}}$  на точность передачи информации.

Как известно, источник сигнала может рассматриваться как генератор тока, если его внутреннее сопротивление  $r$  несоизмеримо больше эквивалентного

сопротивления нагрузки

$$r \gg R_{\text{н.}}$$

В этом случае ток в цепи определяется практически только внутренним сопротивлением источника и значением его электродвижущей силы  $E$ :

$$I = \frac{E}{r + R_{\text{н}}} \approx \frac{E}{r} \neq f(R_{\text{н}}).$$

Для генератора напряжения характерно обратное соотношение этих величин, т. е.

$$r \ll R_{\text{н.}}$$

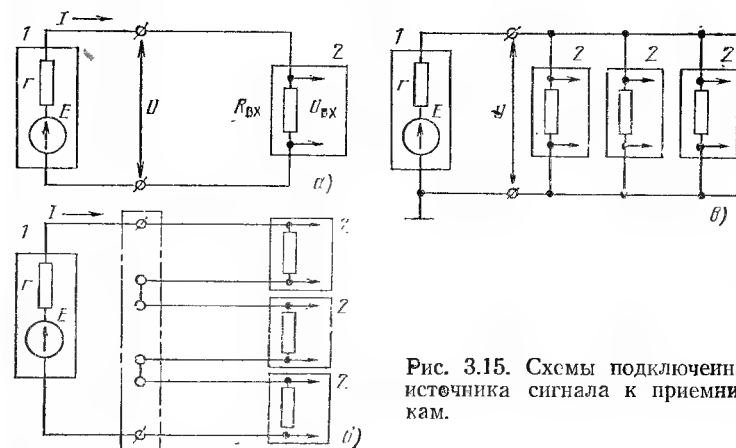


Рис. 3.15. Схемы подключения источника сигнала к приемникам.

При этом напряжение  $U$  на зажимах источника не будет зависеть от сопротивления нагрузки:

$$U = E \frac{R_{\text{н}}}{r + R_{\text{н}}} \approx E \neq f(R_{\text{н}}).$$

Однако на зажимах потребителя напряжение может отличаться от ЭДС источника на значение падения напряжения на сопротивлении линии связи. В связи с этим генератор напряжения используется для передачи сигналов лишь при коротких линиях связи, когда

$$R_{\text{л}} \ll R_{\text{н.}}$$

Связь источника сигнала 1 с его приемником 2 осуществляется по двухпроводной линии (рис. 3.15, а). Во входной цепи приемника ток  $I$  обычно пре-

образуется в сигнал напряжения  $U$  постоянного тока с помощью входного резистора  $R_{вх}$ :

$$U = IR_{вх}.$$

Дальнейшее усиление и преобразование сигнала производится обычно по напряжению, так как это проще выполняется, чем для токового сигнала.

При необходимости выдачи аналогового сигнала к внешним потребителям сигнал по напряжению преобразуется в токовый сигнал.

Применение унифицированного сигнала связи в АСУ ТП предполагает его многократное использование несколькими потребителями. В случае токового унифицированного сигнала все потребители 2 должны включаться последовательно (рис. 3.15,б). Однако это возможно лишь при условии, что входные цепи отдельных потребителей гальванически изолированы между собой.

В случае унифицированного сигнала по напряжению все потребители 2 подключаются параллельно к источнику сигнала 1 (рис. 3.15,в). При этом возможна передача сигналов с использованием одного общего провода. Однако здесь желательно также обеспечить гальваническое разделение входных и выходных цепей потребителей для снижения влияния помех и повышения живучести системы.

К достоинствам передачи аналоговых сигналов на постоянном токе следует отнести то, что при этом оказывается возможным сравнительно простыми средствами подавлять различные помехи, образующиеся на линии связи. Обычно для этой цели в цепи источника напряжения устанавливается демпфер в виде апериодического звена с постоянной времени  $T_{\phi}$  и единичным коэффициентом передачи.

Кроме того, различные статические и динамические преобразования сигналов более удобно выполнять на постоянном токе. В системах «Каскад» и АКЭСР линейные преобразования сигналов выполняются обычно с использованием операционных усилителей постоянного тока, как и в соответствующих узлах аналоговых вычислительных машин. Необходимый закон преобразования сигналов обеспечивается с помощью отрицательных обратных связей, вводимых в усилитель постоянного тока.

Наиболее употребительной является схема с отрицательной обратной связью по напряжению и сложением

токов, которая показана на рис. 3.16,а. При большом коэффициенте усиления операционного усилителя ( $K_y \gg \gg 1$ ) передаточная функция от  $i$ -го входа к выходу (по напряжению) может быть записана следующим образом:

$$W_i(p) = z_{o.c}(p) / z_{вхi}(p).$$

Для выполнения операций суммирования и умножения на постоянный коэффициент в качестве элементов входной цепи  $z_{вхi}$  и обратной связи  $z_{o.c}$  используются

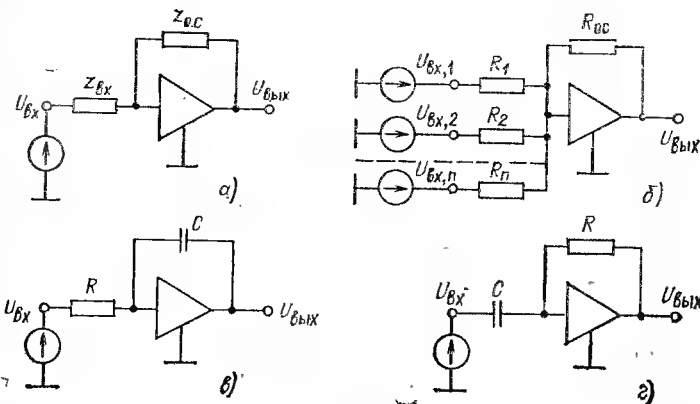


Рис. 3.16. К реализации заданной передаточной функции с помощью операционного усилителя.

активные сопротивления (резисторы)  $R_i$  (где  $i = 1, 2, \dots, n$ ) и  $R_{o.c}$  (рис. 3.16,б). Коэффициент передачи при этом по  $i$ -му входу составляет

$$K_i = \frac{R_{o.c}}{R_i},$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Для выполнения операции интегрирования во входной цепи используются активные сопротивления, а в цепи обратной связи — конденсатор  $C$  (рис. 3.16,в). Действительно, в этом случае с учетом  $z_{o.c}(p) = 1/(pC)$  получаем:

$$W(p) = \frac{1}{RCp} = \frac{1}{Tp}, \text{ где } T = RC.$$

Дифференцирование сигнала может выполняться по схеме, показанной на рис. 3.16,г, когда  $z_{вх}(p) = \frac{1}{pC}$ ;

$z_{oe}(p) = R$ . В этом случае

$$W(p) = RCp = Tr, \text{ где } T = RC.$$

*Усилители постоянного тока, используемые в аппаратуре систем «Каскад» и АКЭСР*

В системе «Каскад» используются операционные усилители УВ-21, УВ-22 и УВ-41. Усилители построены по общему принципу, имеют близкую принципиальную схему, обладают малым дрейфом нуля, высоким входным сопротивлением и относятся к классу усилителей постоянного тока с управляемым генератором.

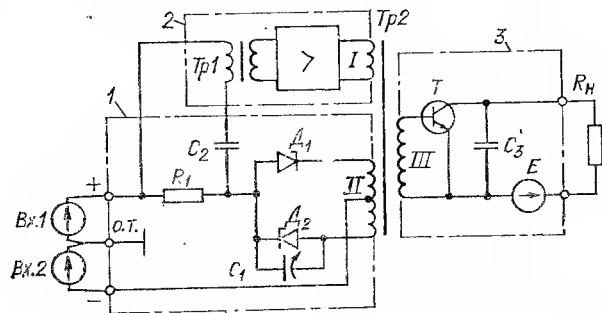


Рис. 3.17. Упрощенная схема операционного усилителя УВ-22.

Наиболее массовым является однополярный усилитель УВ-22, имеющий токовый выходной сигнал 0—5 мА. Усилитель УВ-21 отличается наличием дополнительного выхода по напряжению, гальванически не связанного с основным токовым выходом и служащего для формирования сигнала обратной связи. Усилитель УВ-41 является двухполярным и имеет выходной сигнал  $-0,5 \pm 0 \pm +0,5$  мА при сопротивлении нагрузки 10 кОм. Усилитель применяется в релейно-импульсных регулирующих блоках.

Принцип действия усилителя УВ-22 поясняется схемой, приведенной на рис. 3.17.

Как видно из схемы, усилитель состоит из трех основных частей: узла преобразования 1, коэффициент передачи которого зависит от входного сигнала; высокочастотного транзисторного усилителя переменного напряжения 2 и детектирующего устройства 3.

Узел преобразования содержит параметрическую мостовую схему, образованную двумя варикапами  $D_1$ ,  $D_2$  и обмотками  $\Pi$  согласо-

сующего трансформатора  $Tr_2$ . В качестве варикапов используются кремниевые стабилитроны Д814А.

Входной сигнал подается на варикапы через ограничивающий резистор  $R_1$  и среднюю точку обмотки  $\Pi$   $Tr_2$ . Балансировка параметрического моста осуществляется подстроечным конденсатором  $C_1$ .

Параметрический мост включен в цепь обратной связи высокочастотного усилителя с помощью трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$ . Знак и глубина обратной связи зависят от степени разбаланса мостовой схемы, которая определяется знаком и уровнем входного сигнала.

В процессе настройки при нулевом входном сигнале с помощью конденсатора  $C_1$  создается некоторая положительная обратная связь, при которой усилитель устанавливается вблизи границы автоколебаний, но автоколебания отсутствуют.

При подаче положительного входного сигнала изменяется емкость варикапов таким образом, что увеличивается коэффициент положительной обратной связи через параметрический мост. В замкнутом контуре («усилитель — обратная связь») возникают автоколебания, амплитуда которых в определенных пределах увеличивается пропорционально входному напряжению. Автоколебания оказываются устойчивыми благодаря наличию некоторой нелинейности усилительного тракта, которая проявляется в уменьшении коэффициента усиления с ростом амплитуды. Частота автоколебаний составляет около 1 МГц.

Генерируемые автоколебания с выхода высокочастотного усилителя через трансформатор  $Tr_2$  поступают на детектирующее устройство 3, где они выпрямляются переходом «база — эмиттер» транзистора  $T$ . Выпрямленный ток усиливается этим транзистором и выделяется на нагрузке  $R_n$ , которая вместе с конденсатором  $C_3$  образует фильтр, сглаживающий пульсации выпрямленного напряжения.

При обратном знаке входного сигнала обратная связь становится отрицательной, автоколебания отсутствуют и выходной сигнал усилителя равен нулю.

Усилитель УВ-22 имеет инверсный и неинверсный входы, включенные последовательно. Крутизна усилителя составляет около 1,5 мА/мВ, входное сопротивление более 100 МОм, выходной ток 0—5 мА при сопротивлении нагрузки 2—3 кОм. Выходные цепи усилителя гальванически изолированы от его входных цепей через трансформатор  $Tr_2$ .

Блоки системы «Каскад» содержат один или два (как максимум) операционных усилителя, что объясняется используемой элементной базой (транзисторные и ферритовые элементы).

В системе АКЭСР, реализованной на микроэлектронной элементной базе, операционные усилители используются более широко. Основным является операционный усилитель на интегральной микросхеме К153УД1А. Усилитель выполнен по монолитной интегральной техноло-



гин, т. е. целиком в едином кремниевом кристалле, не превышающем по размеру кристалл одного транзистора. Схема усилителя показана на рис. 3.18,а.

Усилитель имеет (в среднем) коэффициент усиления  $K_y \approx 5 \cdot 10^4$ , входной ток около  $0,3$  мкА, входное сопротивление  $250$  Ом, выходное сопротивление — не более  $200$  Ом, диапазон изменения выходного сигнала  $\pm 10$  В при сопротивлении нагрузки не менее  $2$  кОм.

Первый дифференциальный каскад собран по обычной схеме на транзисторах  $T_1, T_2$  с генератором тока на транзисторе  $T_3$ . Второй каскад — разностная схема на составных транзисторах  $T_6-T_9$ .

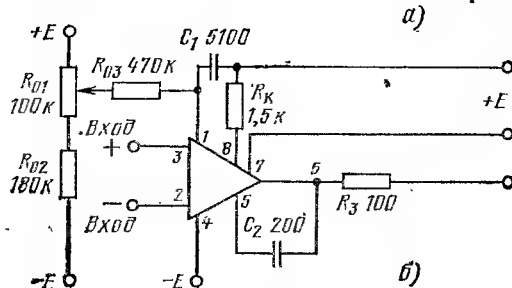
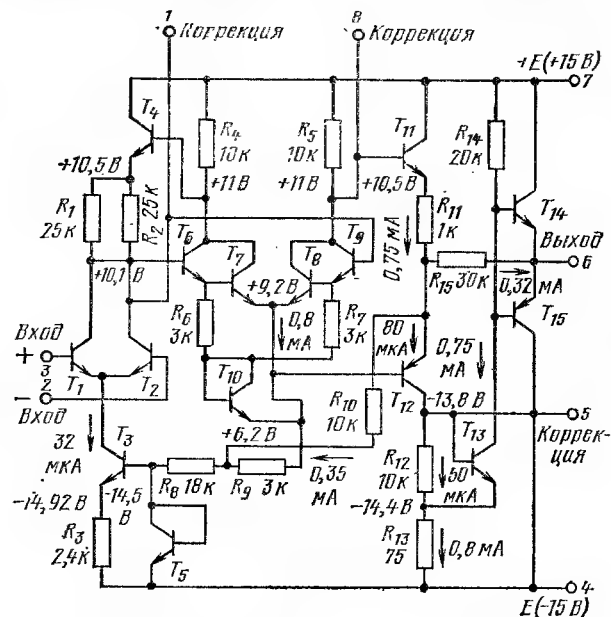


Рис. 3.18. Операционный усилитель К153УД1А.  
а — принципиальная схема; б — типовая схема включения.

Далее включен еще один разностный каскад на транзисторах  $T_{11}, T_{12}$ . Этот каскад нагружен на транзистор  $T_{13}$ , включенный по схеме с общим эмиттером. Сигнал с  $T_{13}$  поступает на выход усилителя через обычный повторитель с дополнительной симметрией (транзисторы  $T_{14}, T_{15}$ ).

На рис. 3.18,б показана типовая схема включения усилителя К153УД1А с цепями коррекции, обеспечивающими его устойчивую работу при охвате внешней отрицательной обратной связи.

Усилители К153УД1А используются в блоках АКЭСР для выполнения операций суммирования, формирования релейной характеристики и др., если требуемое входное сопротивление каскада не превышает  $20$  кОм.

В тех случаях, когда источник входного сигнала является высокоомным (например, цепь функциональной обратной связи в регулирующих блоках), в блоках АКЭСР используется интегральный операционный усилитель К284УД1В с дифференциальным входом на полевых транзисторах. Усилитель выполняется по гибридной тонкопленочной технологии. Это означает, что резисторы нанесены распылением в вакууме на изолирующую подложку; на этой же подложке образованы и проводники; транзисторы — парные и одиночные — в виде бескорпусных кристаллов закрепляются на подложке, а их выводы расплавляются на контактные площадки.

Усилитель имеет очень малый входной ток — около  $3$  нА и высокое входное сопротивление — около  $150$  МОм.

Диапазон изменения выходного сигнала составляет  $\pm 5,3$  В при токе до  $\pm 5$  мА.

### Гальваническое разделение цепей

В сложной системе управления с разветвленными каналами связи имеется опасность появления ложного заземления линии, причем земля может появиться на нескольких участках цепи одновременно. Для повышения живучести системы по отношению к подобным нарушениям предусматривается гальваническая изоляция входных и выходных цепей приборов относительно цепи питания, а во многих блоках — также между входными и выходными цепями.

Гальваническая изоляция цепей особенно необходима для обеспечения возможности последовательного соединения нескольких потребителей или источников сигнала, каждый из которых может иметь свою точку заземления. В частности, это относится к схеме с последо-

вательным включением нескольких потребителей к одному источнику токового сигнала (рис. 3.19,а), к схеме суммирования токовых сигналов во входной цепи потребителя с помощью последовательно включенных входных резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 3.19,б), а также к схеме суммирования сигналов напряжения путем последовательного соединения источников (рис. 3.19,в).

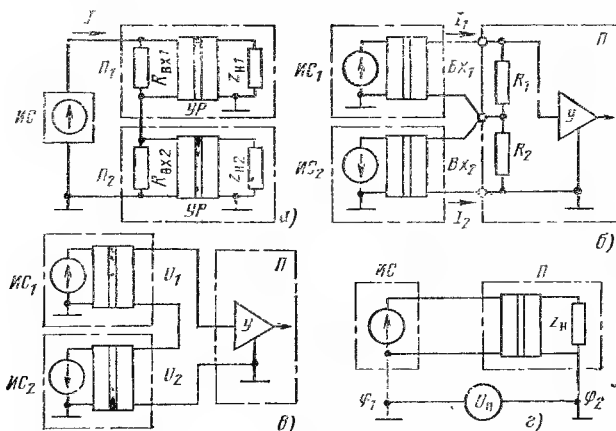


Рис. 3.19. Схемы передачи сигналов с гальваническим разделением цепей.

ИС — источник сигнала; П — приемник сигнала; УР — устройство гальванического разделения; У — усилитель;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — потенциалы точек заземления;  $U_n$  — напряжение помехи.

Кроме того, гальваническая изоляция цепей позволяет защитить систему от помех  $U_n$ , обусловленных разностью потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  между точками заземления источника и приемника сигнала (рис. 3.19,г).

В многоконтурной системе управления гальваническая изоляция между различными контурами системы позволяет локализовать помехи, возникающие в отдельных контурах, т. е. не дает распространяться помехам на другие контуры системы. Например, если в схеме с двумя потребителями токового сигнала (рис. 3.19,а) возникает помеха в цепи нагрузки  $Z_{n1}$ , то эта помеха не оказывает влияния на цепь нагрузки второго потребителя  $Z_{n2}$  благодаря гальванической изоляции потребителей.

Гальваническое разделение цепей постоянного тока

осуществляется обычно по структурной схеме, приведенной на рис. 3.20,а.

В модуляторе М сигнал постоянного тока превращается в последовательность импульсов с использованием амплитудно-импульсной или широтно-импульсной модуляции. Далее импульсный сигнал проходит через разделительный трансформатор Тр, обеспечивающий собственно гальваническое разделение входных и выходных цепей. В демодуляторе ДМ производится фазочувствительное выпрямление сигнала, а с помощью сглаживающего фильтра Ф выделяется постоянная составляющая выпрямленного сигнала.

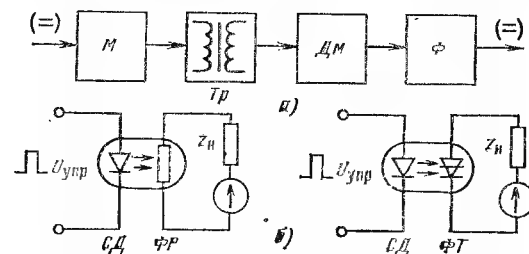


Рис. 3.20. Способы гальванического разделения цепей.

а — с помощью модуляции-демодуляции; б — с применением оптоэлектронных преобразователей.

При передаче дискретных сигналов для осуществления гальванического разделения цепей в блоках АКЭСР применяются также оптоэлектронные преобразователи — оптрона (рис. 3.20,б), содержащие светодиод СД и фоторезистор ФР (резисторный оптрон) или фототиристор ФТ (тиристорный оптрон).

При появлении управляющего сигнала  $U_{упр}$  светодиод СД облучает светом фоторезистор ФР или фототиристор ФТ, которые переходят в проводящее состояние и замыкают собой цепь нагрузки  $Z_n$ . После исчезновения сигнала управления излучение светодиода прекращается. Сопротивление фоторезистора в этот момент резко возрастает, что соответствует отключению цепи нагрузки. Отключение же фототиристора может произойти только тогда, когда не только сигнал управления, но и ток нагрузки снизится до нуля. Поэтому тиристорный оптрон используется обычно для коммутации цепей с пульсирующим до нуля током.

Как уже указывалось, в системе управления с токовым сигналом связи все потребители включаются последовательно, поэтому обрыв линии связи или отключение одного из потребителей приводит к тому, что одновременно прекращается поступление информационного сигнала ко всем остальным потребителям. Для того чтобы сохранить протекание тока в цепи, параллельно контактам потребителей на распределительной колодке подключается сигнальное защитное устройство (рис. 3.21), представляющее собой стабилизатор с нелинейной вольт-амперной характеристикой, отличающейся наличием порогового напряжения включения.

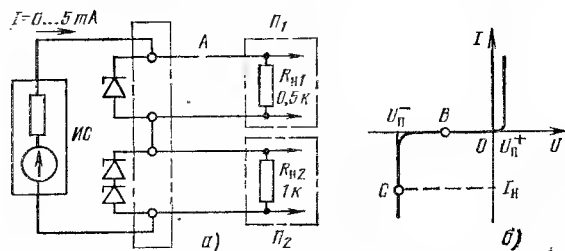


Рис. 3.21. Использование стабилитронов для защиты токовой цепи от разрыва.

*a* — схема включения; *b* — вольт-амперная характеристика защитного устройства.

В нормальном режиме падение напряжения  $U_H = I_H R_H$  на сопротивлении нагрузки  $R_H$ , создаваемое током  $I_H$  источника сигнала, меньше порогового напряжения  $U_H$ , стабилитрон закрыт и ток через него практически равен нулю (точка  $B$  на вольт-амперной характеристике). При обрыве линии связи одного из потребителей (в точке  $A$  на рис. 3.21,б) напряжение на нагрузке скачком возрастает (так как источник сигнала стремится поддерживать силу тока в цепи), стабилитрон открывается и в цепи сохраняется прежнее значение силы тока. Напряжение на зажимах потребителя становится равным  $U_H$  (точка  $C$  на вольт-амперной характеристике), а на зажимах источника напряжение возрастает на величину  $\Delta U = U_H - I_H R_H$  (предполагается, что источник сигнала имеет соответствующий запас по напряжению).

Подобное защитное устройство для распределения токового сигнала выпускается в рамках системы

«Каскад» (защитное устройство В-01) и рассчитано на подключение к блокам с входным сопротивлением 400—500 Ом (при токе 0—5 мА) и имеет порог включения, равный 5,6 В. В случае большего входного сопротивления потребителя (например, при  $R_n=1$  кОм) следует использовать последовательное включение защитных устройств для снижения погрешности, связанной с протеканием тока через стабилитрон, когда напряжение на нагрузке близко к порогу включения стабилитрона.

## Глава четвертая

## ОСНОВНЫЕ БЛОКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГСП

#### 4.1. Устройства статического и динамического преобразования системы «Каскад»

- Аппаратура системы «Каскад» обеспечивает выполнение разнообразных функций, характерных для автоматических систем регулирования современных теплоэнергетических объектов.

По своему функциональному назначению все устройства, относящиеся к аппаратуре «Каскад», можно разделить на следующие группы: статического преобразования информации, динамического преобразования информации, оперативного управления, исполнительные и вспомогательные.

## Устройства статического преобразования информации

1. Измерительный блок И-04. Блок позволяет осуществить следующие операции (см. рис. 4.1,а):

суммирование четырех токовых сигналов, 0—5 мА с предварительным масштабированием;

компенсацию полученной суммы сигналом встроенного корректора;

введение сигнала задания от внешнего потенциометрического задатчика ЗУ-11 и формирование сигнала рассогласования;

гальваническое разделение входных и выходных цепей.

Выходной сигнал блока И-04 не унифицирован, изменяется в пределах  $\pm 2,5$  В и рассчитан только на под-

ключение к высокоомному входу регулирующего блока. Блок И-04 используется поэтому в комплекте с регулирующим блоком.

2. Блок суммирования А-04. Блок обеспечивает (рис. 4.1,б):

суммирование четырех токовых сигналов 0—5 мА с предварительным масштабированием и выдачей результата также в виде токового сигнала 0—5 мА;

гальваническое разделение входных и выходных цепей.

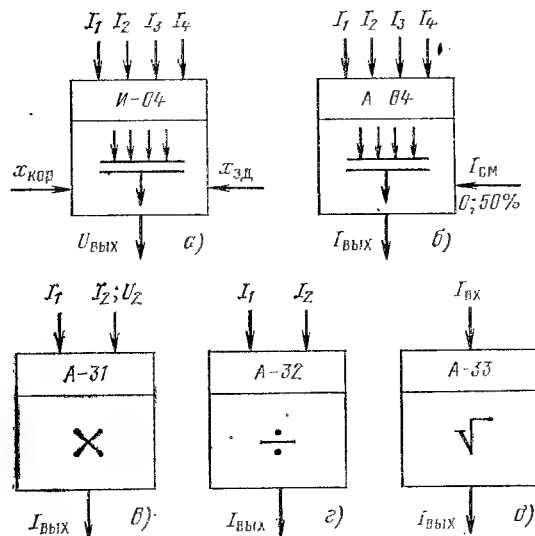


Рис. 4.1. Обозначения блоков системы «Кас-кад».

а — И-04; б — А-04; в — А-31; г — А-32; д — А-33.

В блоке А-04 предусмотрена возможность добавления постоянного смещения  $I_{см}=2,5$  мА (50%) к результату суммирования, если результат находится в пределах  $-2,5 \div 0 \div +2,5$  мА. Входное сопротивление блока А-04 по каждому каналу составляет 0,4 кОм, а выход рассчитан на нагрузку с сопротивлением до 3 кОм.

Блок А-04 широко используется в системах регулирования для суммирования сигналов и в качестве устройства ввода-вывода благодаря высокой нагрузочной способности и гальваническому разделению входных и выходных цепей.

3. Блок умножения А-31. Блок выполняет операцию умножения двух сигналов (рис. 4.1,в) в соответствии с зависимостью

$$I_{\text{вых}}=0,2I_1I_2$$

или

$$I_{\text{вых}}=0,4I_1U_2,$$

где токи выражены в миллиамперах (0—5 мА), а напряжение — в вольтах (0—2,5 В).

4. Блок деления А-32. Блок выполняет операцию деления (рис. 4.1,г) двух токовых сигналов в соответствии с выражением

$$I_{\text{вых}}=I_1/I_2,$$

где все токи выражены в миллиамперах.

В блоках А-31 и А-32 входы  $I_1$  и  $I_2$  гальванически изолированы между собой, а выход связан с входом  $I_1$ .

5. Блок извлечения корня А-33. Блок выполняет операцию извлечения квадратного корня в соответствии с зависимостью (рис. 4.1,д)

$$I_{\text{вых}}=\sqrt{5I_{\text{вх}}},$$

где входной и выходной токи выражены в миллиамперах. Выход блока гальванически связан с входом.

Входное сопротивление для всех токовых входов блоков А-31, А-32, А-33 составляет 0,5 кОм, а выход рассчитан на нагрузку с сопротивлением 0—3 кОм.

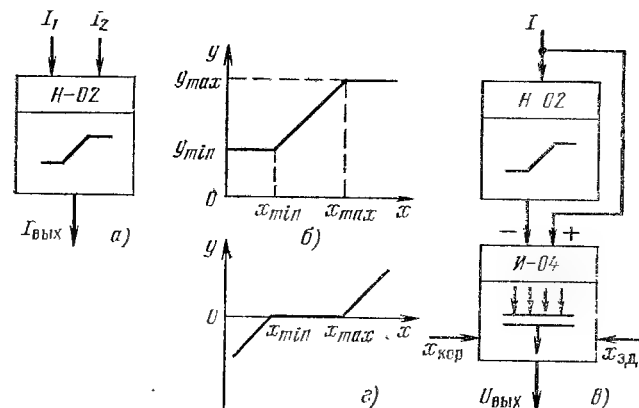


Рис. 4.2. Блок типа И-02.

а — условное обозначение; б — статическая характеристика; в — схема реализации нелинейности типа зоны нечувствительности; г — статическая характеристика для схемы в.

6. Блок ограничения Н-02 (рис. 4.2,а). Блок предназначен для применения в схемах автоматического регулирования в качестве устройства, обеспечивающего ограничение токового сигнала по минимуму и максимуму. Статическая характеристика блока показана на рис. 4.2,б.

Блок имеет два входа: вход  $I_1$  для сигнала 0—5 мА при  $R_{вх}=0,5$  кОм и вход  $I_2$  для сигнала 0—20 мА при  $R_{вх}=0,125$  кОм. Выход блока гальванически изолирован от входов и рассчитан на нагрузку 0—3 кОм при токе 0—5 мА. В комплекте с сумматором (например, с блоком И-04) блок позволяет реализовать нелинейность типа зоны нечувствительности (рис. 4.2,в,г).

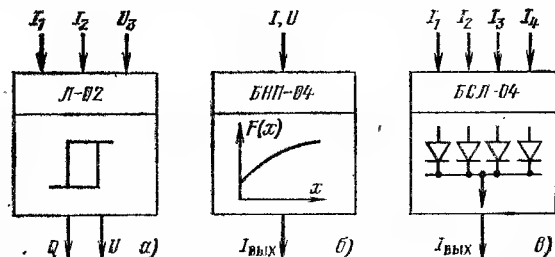


Рис. 4.3. Обозначения блоков Л-02 (а), БНП-04 (б) и БСЛ-04 (в).

Нижний уровень ограничения устанавливается плавно в пределах 0—100%, а верхний — от 20 до 100%.

7. Блок аналого-релейного преобразования Л-02. Блок реализует характеристику двухпозиционного реле с зоной возврата (рис. 4.3,а) и используется в схемах сигнализации и защиты, в схемах синхронизации хода двух исполнительных механизмов и других логических схемах управления.

Блок имеет два токовых входа 0—5 мА при  $R_{вх}=400$  Ом и один вход по напряжению 0—2,5 В с  $R_{вх} \geq 10$  кОм. Все входы гальванически изолированы друг от друга. Выходной сигнал формируется в виде двух пар переключающих контактов  $Q$  электромагнитного реле, а также в виде напряжения постоянного тока 0; 24 В.

8. Блок нелинейных преобразований БНП-04 (рис. 4.3,б). Блок предназначен для воспроизведения статической функциональной зависимости  $I_{вых}=F(I_{вх})$  с помощью кусочно-линейной аппроксимации из шести участков.

9. Блок селектирования БСЛ-04 (рис. 4.3,в). Блок обеспечивает выделение наибольшего или наименьшего из четырех гальванически разделенных друг от друга токовых сигналов; помимо основного токового выходного сигнала блок имеет логический выход для сигнализации выделенного канала.

Блоки БНП-04 и БСЛ-04 разработаны в рамках комплекса АКЭСР и выпускаются Ивано-Франковским приборостроительным заводом.

### Устройства динамического преобразования информации системы «Каскад»

1. Регулирующий блок аналоговый Р-12. Блок обеспечивает формирование выходного сигнала постоянного тока 0—5 мА, связанного с входными сигналами пропорциональным (П), пропорционально-интегральным (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом преобразования имеет

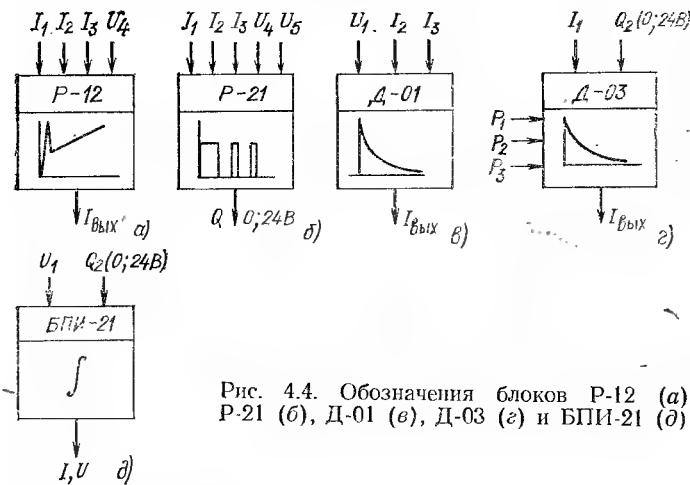


Рис. 4.4. Обозначения блоков Р-12 (а), Р-21 (б), Д-01 (в), Д-03 (г) и БПИ-21 (д).

встроенный ограничитель выходного сигнала по минимуму и максимуму, а также обеспечивает демпфирование (сглаживание пульсаций) входных сигналов.

Блок может применяться в качестве корректирующего регулятора в каскадных системах регулирования, а также для управления позиционерами или другими пропорциональными исполнительными устройствами.

Безударное переключение выходных цепей регулирующего блока с автоматического управления на ручное и обратно осуществляется с помощью выносного блока управления БУ-12. Блок имеет два токовых входа  $0—5$  мА с  $R_{вх}=500$  Ом, один вход  $0—20$  мА с  $R_{вх}=125$  Ом и один высокоомный вход по напряжению  $0—2,5$  В, рассчитанный на подключение выхода измерительного блока И-04 (рис. 4.4,а).

2. Регулирующий блок релейный Р-21. Блок служит для формирования импульсов управления электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости, в комплекте с которым обеспечивает реализацию ПИ-закона регулирования.

Переключение выходных цепей регулирующего блока Р-21 с автоматического управления на ручное и обратно осуществляется с помощью выносного блока управления БУ-21.

Блок имеет пять входов, гальванически связанных друг с другом (рис. 4.4,б):

высокоомный вход по напряжению  $0—\pm 2,5$  В для подключения выхода измерительного блока И-04;

два токовых входа  $0—\pm 5$  мА при  $R_{вх}=500$  Ом;

один токовый вход  $0—\pm 20$  мА при  $R_{вх}=125$  Ом;

высокоомный вход по напряжению  $0—\pm 24$  В для подключения устройства динамической связи.

Активно-индуктивная нагрузка (например, пускатель ПМРТ-69) подключается через согласующую приставку В-21.

Выходные цепи блока Р-21 гальванически изолированы от входных цепей.

3. Блок дифференцирования Д-01. Блок реализует передаточную функцию реального дифференцирующего или пропорционального звена, используется обычно в каскадных системах регулирования, в системах регулирования с компенсацией возмущения (в качестве звена компенсации), а также для формирования сигнала по скорости изменения входной величины.

Блок имеет три гальванически связанных входа (рис. 4.4,в):

вход для сигнала напряжения постоянного тока  $0—2,5$  В при  $R_{вх} \geq 30$  кОм;

вход для токового сигнала  $0—5$  мА при  $R_{вх}=500$  Ом;

вход для токового сигнала  $0—25$  мА при  $R_{вх}=125$  Ом.

Выходной сигнал—токовый, от  $-5$  до  $+5$  мА при сопротивлении нагрузки от  $0$  до  $2,5$  кОм.

4. Блок динамического преобразования Д-03. Блок обеспечивает реализацию передаточной функции одного из следующих звеньев: реального дифференцирующего, идеального дифференцирующего, апериодического, интегрирующего и пропорционального. В блоке предусмотрены также демпфирование (сглаживание пульсаций) входного сигнала и ограничение выходного сигнала по максимуму и минимуму. Особенностью блока является возможность дистанционного дискретного изменения коэффициента передачи и постоянной времени. Имеются три ступени автоподстройки, управление которыми производится замыканием специальных входов  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  с помощью контактов порогового устройства (например, Л-02).

Блок имеет (рис. 4.4,г) вход  $I_1$  для аналогового токового сигнала  $0—5$  мА и вход  $Q_2$  для дискретного сигнала по напряжению  $0; 24$  В с трехпроводной схемой соединений, рассчитанной на подключение к активному выходу релейного регулирующего блока Р-21.

Выходной сигнал—токовый от  $-5$  до  $+5$  мА.

Кроме рассмотренных устройств динамического преобразования информации в системах регулирования, реализованных на аппаратуре «Каскад», используется также блок прецизионного интегрирования БПИ-21, выпускаемый в составе комплекса АКЭСР.

Блок предназначен для интегрирования аналогового сигнала ( $0—\pm 10$  В) или широтно-модулированного импульсного сигнала релейного регулирующего блока (активного или пассивного) с трехпроводной схемой подключения (рис. 4.4,д). Блок имеет логическую схему управления интегратором, узел двухпределной сигнализации и ограничения выходного сигнала, кондуктивный разделитель, а также запоминающее устройство на ферритовых сердечниках, которое обеспечивает сохранение информации при перерывах питания.

Блок имеет выход по току и по напряжению, может использоваться в качестве автоматического задатчика с дистанционным импульсным управлением, для преобразования дискретных сигналов в аналоговые, а также в комплекте с релейно-импульсным регулирующим блоком в качестве корректирующего регулятора. С помощью блока БПИ-21 удобно осуществлять связь с управля-

щей вычислительной машиной, если ее сигналы носят характер импульсов с широтной модуляцией.

#### **4.2. Блоки оперативного управления и исполнительные устройства системы «Каскад»**

*Устройства оперативного управления системы «Каскад»*

1. Устройство задающее потенциометрическое ЗУ-11. Устройство предназначено для оперативного изменения заданного значения регулируемой величины с пульта управления. Представляет собой переменный резистор со шкалой. Используется в комплекте с измерительным блоком И-04, имеющим специальный вход для подключения ЗУ-11. Применяется в том случае, если не требуется распределение сигнала задания несколькими потребителям и если измерительный блок И-04 удален от задатчика не более чем на 100 м.

2. Устройство задающее токовое ЗУ-05. Токовой задатчик ЗУ-05 обеспечивает формирование задания в виде унифицированного токового сигнала 0—5 мА с ручным управлением, применяется в тех случаях, когда в системе регулирования отсутствует измерительный блок, требуется распределение сигнала задания несколькими потребителям, когда линия связи превышает 100 м, а также в качестве источника сигнала смещения.

3. Блок управления аналогового регулятора БУ-12. Блок предназначен для безударного переключения выходных цепей аналогового регулирующего блока Р-12 с автоматического управления на ручное и обратно, а также для ручного управления током нагрузки с помощью встроенного токового задатчика.

4. Блок управления релейного регулятора БУ-21. Блок позволяет реализовать следующие функции:

переключение цепей управления исполнительным механизмом постоянной скорости при работе его в комплекте с релейным регулирующим блоком Р-21 с возможностью установки трех режимов: автоматического управления (А), ручного управления (Р) и внешнего (В);

ручное дистанционное управление исполнительным механизмом с помощью кнопок «Меньше» — «Больше» в режиме Р;

световую сигнализацию срабатывания релейного регулирующего блока двумя индикаторными лампочками с кнопкой включения индикации «И».

*Исполнительные устройства системы «Каскад»*

В соответствии с двумя разновидностями регулирующих блоков в системе «Каскад» имеется два вида усилителей мощности: для усиления аналогового сигнала 0—5 мА и для усиления дискретного сигнала 0; 24 В (релейные усилители).

Аналоговый усилитель мощности У-252 представляет собой бесконтактное тиристорное устройство с фазовым управлением, используется в комплекте с блоком Р-12 и предназначен для управления объектами, требующими непрерывного изменения электрического сигнала (например, электропечами).

Релейные усилители мощности применяются в комплекте с релейными регулирующими блоками и электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости. В системе «Каскад» могут использоваться все рассмотренные выше (§ 3.2) исполнительные устройства:

тиристорный усилитель мощности релейный типа У-101 с исполнительными механизмами МЭОБ производства МЗТА;

пускатель бесконтактный реверсивный типа ПБР-2 с исполнительными механизмами МЭО производства ЧЗЭИМ;

пускатель магнитный реверсивный типа ПМРТ-69 с исполнительным механизмом МЭОК и с согласующей приставкой В-21.

*Вспомогательные устройства системы «Каскад»*

Группу приборов вспомогательного назначения системы «Каскад» образуют следующие устройства:

защитное устройство В-01, содержащее кремниевый стабилитрон и применяемое для распределения токового сигнала несколькими потребителям с целью защиты токовой цепи от разрыва при отключении какого-либо потребителя или обрыве линии связи; защитные устройства обычно устанавливаются непосредственно на клеммной колодке (устройство распределения сигналов), от которой отходят линии связи к потребителю;



блок указателей В-12, содержащий два стрелочных индикатора с пределами измерения  $0-5$  мА и  $-0,625 \div 0 \div +0,625$  В, первый из которых используется для контроля выходного сигнала аналогового регулирующего блока Р-12 или в качестве индикатора положения исполнительного механизма, а второй — для контроля сигнала рассогласования на входе регулирующих блоков в диапазоне  $-25 \div 0 \div +25\%$ ;

блок согласующих приставок В-21, используемых при работе релейного регулирующего блока Р-21 с магнитным пускателем ПМРТ-69; приставка В-21 обеспечивает гашение выходных тиристоров блока Р-21 при работе на активно-индуктивную нагрузку; в состав одного блока В-21 входят три независимые согласующие приставки.

### 4.3. Особенности аппаратуры АКЭСР

Агрегатный комплекс электрических средств регулирования (АКЭСР) по сравнению с другими комплексами средств автоматического регулирования имеет ряд особенностей, основные из которых следующие:

1. Широкое использование интегральных микросхем специального и общего назначения, благодаря чему сокращаются габариты отдельных модулей и обеспечивается высокая надежность устройств.

2. Повышение функциональной насыщенности отдельных блоков: каждый блок может выполнять обычно несколько функций одновременно, благодаря чему сокращается общее количество блоков в системе управления.

3. Расширение функциональных возможностей системы управления благодаря реализации новых функций, среди которых отметим следующие:

возможность дистанционного (дискретного или аналогового) изменения параметров динамической настройки регулирующих блоков;

интегрирование импульсного или аналогового сигнала с сохранением значения выходного сигнала при перерывах питания, что позволяет создавать дистанционные автоматические задатчики, обеспечивать связь с управляющей вычислительной машиной и др.;

возможность дистанционного и автоматического переключения режима работы систем регулирования с помощью блоков управления, реализованных на базе

двухобмоточных электромагнитных реле с магнитной фиксацией и импульсным управлением;

выделение экстремального (максимального или минимального) сигнала из нескольких входных сигналов; нелинейное преобразование сигнала.

4. Наличие двух вариантов конструктивного исполнения регулирующих и функциональных блоков — приборного (с индексом «П») и шкафного (с индексом «Ш»). В приборном исполнении каждый блок содержит автономный источник питания и заключается в индивидуальный корпус, рассчитанный на щитовой утопленный монтаж. В шкафовом исполнении каждый блок выполняется в виде вставного субблока, предназначенного для установки в блочные вставные каркасы, которые монтируются затем в шкафах. Питание шкафовых субблоков осуществляется от групповых блоков питания.

При использовании шкафного варианта оказывается возможным изготовлять в условиях приборостроительного завода отдельные типовые узлы систем регулирования или даже целые системы, что значительно сокращает сроки разработки и внедрения, а также повышает надежность и качество АСУ ТП.

5. Широкий круг применяемых унифицированных сигналов связи. В качестве сигналов связи между устройствами АКЭСР в пределах центральной части системы управления приняты сигналы напряжения постоянного тока  $0-\pm 10$  В. При обмене аналоговой информацией с внешними устройствами используются сигналы связи постоянного тока  $0-5$ ;  $0-20$  или  $4-20$  мА. Для повышения помехозащищенности и надежности центральной части системы регулирования внешние аналоговые сигналы вводятся обычно через блоки кондуктивного разделения.

6. Наличие источников опорного напряжения  $U^+_{оп} = +10$  В и  $U^-_{оп} = -10$  В, которые могут использоваться совместно с делителями напряжения в качестве встроенного задатчика, для компенсации постоянной составляющей сигнала.

Так как многие блоки АКЭСР реализуют одновременно несколько различных функций, при изображении функциональной структуры системы управления оказывается затруднительным, а часто и невозможным, обозначать блоки АКЭСР с помощью одного символа.

В связи с этим разработчиками комплекса АКЭСР рекомендуется обозначать на функциональной схеме блоки в виде совокупности узлов, реализующих элементарные функции; при этом используются условные обозначения, приведенные на рис. 4.5 — 4.13.

Все многообразие блоков АКЭСР при их последующем рассмотрении удобно разбить на группы в соответствии с их функциональным назначением: ввода-вывода информации, статического и динамического преобразования, оперативного управления и исполнительные устройства.

Для упрощения описания индексы «П» или «Ш» в обозначениях блоков опущены.

#### 4.4. Устройства ввода-вывода информации АКЭСР

Группу устройств ввода-вывода информации системы АКЭСР образуют блоки кондуктивного разделения (БКР), выпускаемые в трех модификациях (рис. 4.5).

В каждой из модификаций производится преобразование токового сигнала (0—5; 0—20; 4—20 мА) в сигнал напряжения (0—10 В), гальваническое разделение входных и выходных цепей, демпфирование или дифференцирование с помощью апериодического или реального дифференцирующего звена с постоянной времени  $T=0\div 24$  с коэффициентом усиления  $C=0,5\div 24$ .

Блок БКР1 (блок кондуктивного разделения и суммирования) в дополнение к общим функциям выполня-

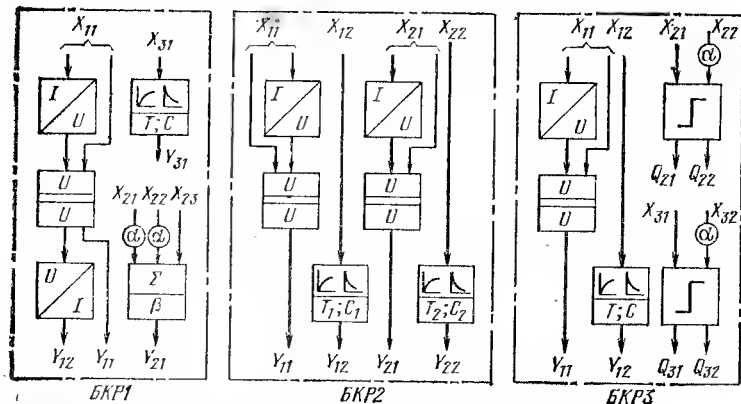


Рис. 4.5. Блоки кондуктивного разделения.  
а — БКР1; б — БКР2; в — БКР3.

ет алгебраическое суммирование трех сигналов с масштабированием двух из них, а также преобразование сигнала напряжения в токовый сигнал.

Блок БКР2 (блок кондуктивного разделения двухканальный) отличается тем, что имеет два независимых идентичных канала, каждый из которых реализует указанные общие функции.

Блок БКР3 (блок кондуктивного разделения с двухканальной сигнализацией) в дополнение к общим функциям также обеспечивает двухпредельную сигнализацию с независимой установкой порогов срабатывания и контактным выходом.

Блоки БКР используются в качестве устройств связи системы регулирования с внешними системами и устанавливаются по каждому из каналов связи.

При этом для ввода сигналов в систему регулирования может применяться та из трех модификаций блоков БКР, которая в большей степени отвечает функциональной структуре системы. Если специальные функции не требуются, то следует использовать двухканальный блок типа БКР2 для сокращения количества аппаратуры. Для вывода аналоговых сигналов из системы регулирования (с выдачей токового сигнала) предназначена модификация БКР1.

#### 4.5. Блоки статического и динамического преобразования АКЭСР

*Устройства статического преобразования информации*

1. Блок вычислительных операций БВО. Блок является универсальным вычислительным устройством и обеспечивает выполнение любого из следующих действий (рис. 4.6): умножения двух сигналов, возведения в квадрат, деления двух сигналов, извлечения квадратного корня. Кроме того, блок содержит два сумматора, один из них имеет три входа с масштабированием двух сигналов и обеспечивает умножение суммы на постоянный коэффициент  $\beta_2=0,5; 1,0; 5$ . Дру-

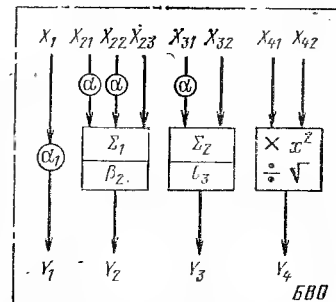


Рис. 4.6. Блок вычислительных операций БВО.

той сумматор имеет два выхода, один из которых масштабируется, а сумма умножается на постоянный коэффициент  $C_3=1\div 10$ .

В блоке БВО имеется также один свободный делитель напряжения  $\alpha_1$  для масштабирования любого из входных сигналов (по напряжению) в пределах от 0 до 1.

2. Блок сигнализации БСГ. Блок имеет два идентичных канала. В каждом из них содержится (рис. 4.7) сумматор на два входа с масштабированием одного из них и умножением суммы на коэффициент  $\beta=0,5; 1$  или  $5$ , а также двухпозиционный релейный элемент (нуль-орган) с настраиваемой зоной возврата  $\Delta_v$ . Выходной сигнал — логический; выдается с по-

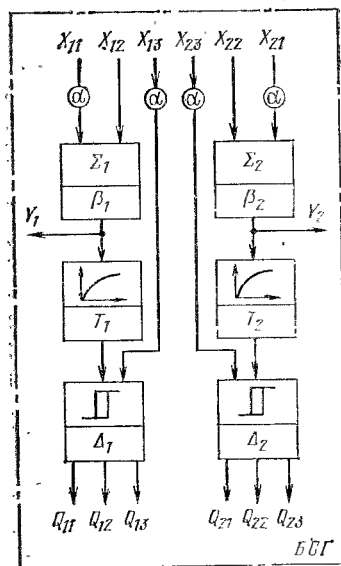


Рис. 4.7. Блок сигнализации БСГ.

мощью двух переключающих контактов реле и одного тиристорного ключа. Блок позволяет реализовать двухпозиционную релейную характеристику с зоной возврата по двум независимым каналам или трехпозиционную релейную характеристику с зоной нечувствительности и зоной возврата для одного канала.

3. Блок нелинейных преобразований БНП. Блок обеспечивает получение нелинейной зависимости выходного сигнала от входного  $y=F(x)$  путем кусочно-линейной аппроксимации из шести участков,

один из них и умножением суммы на коэффициент  $\beta=0,5; 1$  или  $5$ , а также двухпозиционный релейный элемент (нуль-орган) с настраиваемой зоной возврата  $\Delta_v$ . Выходной сигнал — логический; выдается с по-

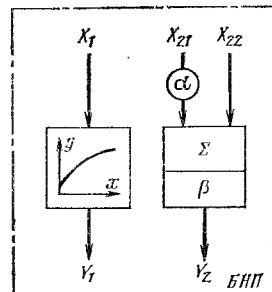


Рис. 4.8. Блок нелинейных преобразований БНП.

а также суммирование двух сигналов с масштабированием одного из них (рис. 4.8).

4. Блок селектирования БСЛ. Блок содержит (рис. 4.9) четыре сумматора с умножением на постоянный коэффициент. Общее число входов — 12, четыре из которых масштабируются. На выходе сумматоров установлены диоды. Такая структура блока позволяет реализовать следующие функции: получение четырех линейных комбинаций из двенадцати входных сигналов;

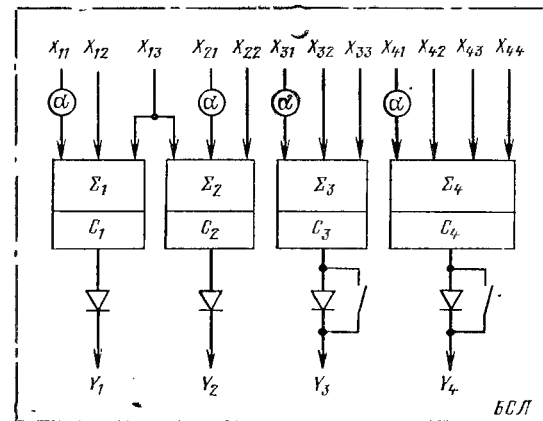


Рис. 4.9. Блок селектирования БСЛ.

выделение наибольшего (наименьшего) сигнала из четырех (трех) линейных комбинаций входных сигналов с сигнализацией выделенного канала; воспроизведение простейших нелинейных зависимостей (ограничение, зона нечувствительности и др.).

Все рассмотренные блоки статического преобразования информации рассчитаны на сигналы по напряжению. Это замечание не относится к блокам БСЛ-04 и БНП-04, которые предназначены для работы с аппаратурой «Каскад» и имеют токовые входы и выходы с гальваническим разделением цепей.

*Устройство динамического преобразования информации*

1. Регулирующий блок импульсный РБИ. Блок предназначен для формирования ПИ- и ПИД-закона регулирования в автоматических регуляторах, со-

держат исполнительные устройства постоянной скорости.

Выпускаются три основные разновидности блока РБИ, отличающиеся видом дистанционной подстройки динамических параметров — скорости связи  $V_{св}$  и постоянной времени интегрирования  $T_{и}$  (рис. 4.10).

Блок РБИ1 не имеет дистанционной подстройки параметров.

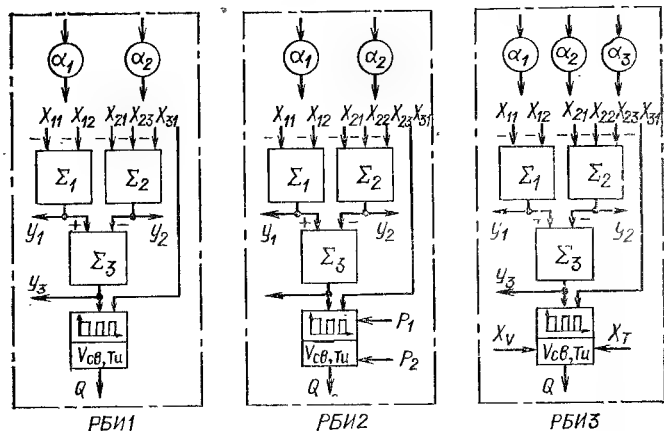


Рис. 4.10. Регулирующие блоки импульсные РБИ.  
а — РБИ1; б — РБИ2; в — РБИ3.

Блок РБИ2 обеспечивает дискретную дистанционную подстройку параметров  $V_{св}$  и  $T_{и}$  (всего три ступени). Исходные значения параметров устанавливаются вручную, как в блоке РБИ1, с помощью переключателей « $V_{св}$ » и « $T_{и}$ ». Переход на ту или иную ступень подстройки осуществляется путем замыкания входов  $P_1$  или  $P_2$  с общей шиной с помощью внешнего сигнального устройства (например, БСГ).

Блок РБИ3 обеспечивает аналоговую дистанционную подстройку параметров  $V_{св}$  и  $T_{и}$  путем подачи внешних аналоговых сигналов 0—10 В на специальные входы  $X_v$  и  $X_r$ .

Применение блоков РБИ3 и РБИ2 позволяет создавать системы с автоматической настройкой параметров (адаптивные системы), которые автоматически приспособляются к изменениям характеристик объекта управления.

Блоки РБИ имеют пассивный и активный выход дискретного сигнала для управления исполнительным механизмом через пусковое устройство. При работе с тиристорным пускателем ПБР-2 рекомендуется использовать активный выход блока РБИ.

2. Регулирующий блок аналоговый РБА. Блок (рис. 4.11) обеспечивает формирование сигнала рассогласования и его динамическое преобразование в

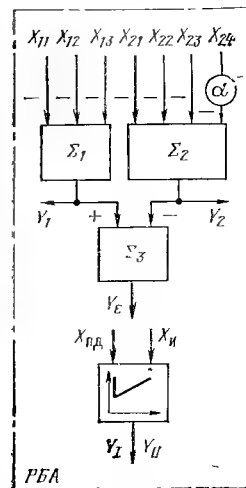


Рис. 4.11. Регулирующий блок аналоговый РБА.

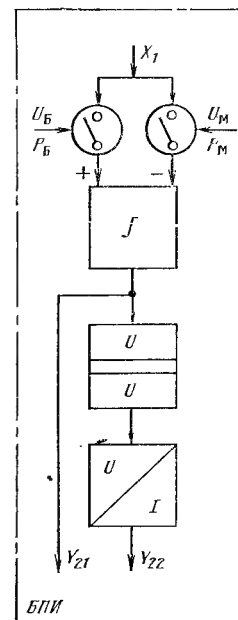


Рис. 4.12. Блок прецизионного интегрирования БПИ.

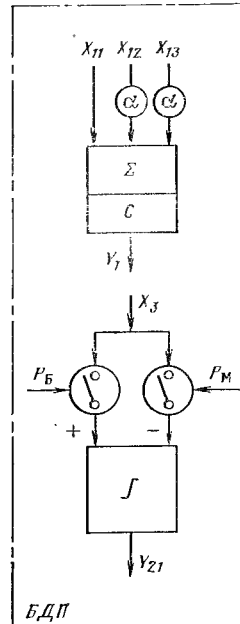


Рис. 4.13. Блок динамических преобразований БДП.

выходной аналоговый сигнал в соответствии с П-, ПД-, ПИ- или ПИД-законом регулирования с ограничением выходного сигнала по верхнему или нижнему уровню. Блок имеет кондуктивное разделение входных и выходных цепей и обеспечивает безударное переключение с режима ручного управления на автоматический и обратно.

Блок РБА имеет пять входов для аналоговых сигналов по напряжению и два входа для сигналов по току.

ку. Блок имеет выход как по напряжению, так и по току.

3. Блок прецизионного интегрирования БПИ. Блок рассматривался при описании функционального состава аппаратуры «Каскад» как устройство БПИ-21, разработанное в комплексе АКЭСР. Заместим, что блоки БПИ-21 и БПИ-П выполнены по одной схеме и отличаются только нумерацией выводов. Основное назначение блока — преобразование дискретного сигнала в аналоговый и интегрирование аналогового сигнала с логическим управлением и сохранением информации при перерывах питания. Условное изображение блока БПИ показано на рис. 4.12.

4. Блок динамических преобразований БДП. Основу блока составляет интегратор с логическим управлением, двухпредельной сигнализацией и ограничением выходного сигнала, подобный тому, который имеется в блоке БПИ. Но в отличие от блока БПИ блок БДП не имеет ферритового запоминающего устройства, кондуктивного разделителя и преобразователя «напряжение — ток». Вместо этих узлов блок БДП содержит сумматор на три входа, два из которых масштабируются (рис. 4.13). Кроме того, интегратор в блоке БДП выполнен с меньшей (в четыре раза) дискретностью выходного сигнала, чем в блоке БПИ.

Наличие сумматора и интегратора в блоке БДП позволяет его использовать (помимо операции интегрирования) для реализации аperiodического или реально-дифференцирующего звена. В связи с этим, блок БДП может применяться в каскадных системах регулирования с исчезающим сигналом из промежуточной точки, в качестве звена компенсации в комбинированных системах регулирования и др.

#### 4.6. Блоки оперативного управления и исполнительные устройства системы АКЭСР

**Ручные задатчики.** В системе АКЭСР имеются два типа ручных задатчиков — РЗД и РЗД-К (рис. 4.14). Каждый из них обеспечивает ручную установку задания регулирующим или аналоговым исполнительным устройством в виде унифицированного аналогового сигнала по току (0—5; 0—20; 4—20 мА) или по напряжению (0—10 В). Задатчик типа РЗД-К (кнопочный) дополнительно содержит дистанционный переключатель

на два положения с импульсным управлением, а также кнопку для ручной установки переключателя в одно из положений. Одна из функций задатчика РЗД-К — резервирование аналогового регулирующего блока РБА при длительном переводе его на ручное управление.

**Блоки управления.** Одной из особенностей комплекса АКЭСР является импульсный способ переключения блоков управления, которые выполнены на основе элек-

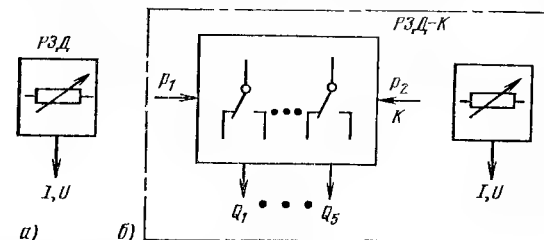


Рис. 4.14. Ручные задатчики.  
а — РЗД и б — РЗД-К.

тромагнитных двухобмоточных реле с магнитной фиксацией (дистанционных переключателей). Выпускаются четыре вида блоков управления. Наиболее универсальным является блок ручного управления с встроенным указателем типа БРУ-У (рис. 4.15). Блок имеет три кнопки: кнопка А — включение автоматического режима; кнопка < — ручное управление в сторону «Меньше»; кнопка > — ручное управление в сторону «Больше».

Для перевода БРУ-У из режима ручного управления в автоматический достаточно одновременно нажать кнопку А; при этом через обмотку  $P_2$  двухобмоточ-

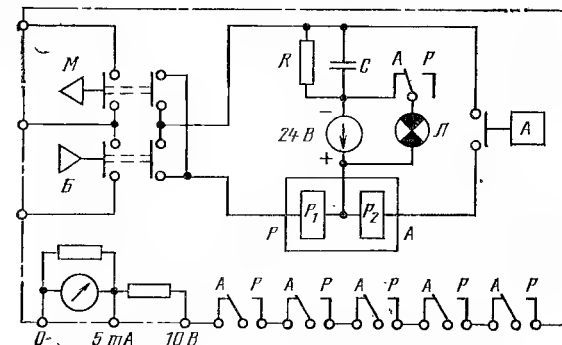


Рис. 4.15. Блок управления БРУ-У.

точного реле протекает импульс тока, формируемый с помощью конденсатора  $C$ , и реле переходит в состояние  $A$ , изображенное на рисунке. Одновременно загорается индикаторная лампочка БРУ-У, цепь которой замыкается одной из групп контактов реле.

Для установления режима ручного управления достаточно одновременно нажать одну из кнопок  $\triangleleft$  («Меньше») или  $\triangleright$  («Больше»). При этом импульс тока проходит через обмотку  $P_1$  двухобмоточного реле, в результате чего реле переводится в состояние  $P$ , а индикаторная лампочка гаснет. Другие контакты указанной кнопки, а также свободные контакты двухобмоточного реле используются в цепи управления пусковым устройством исполнительного механизма.

Достоинством импульсного способа управления блоками БРУ является возможность осуществления автоматических переключений в системе (например, по команде какого-либо логического устройства) без вмешательства оператора.

Блок управления типа БРУ-У имеет встроенный указатель, рассчитанный на токовый сигнал 0—5 мА и на сигнал напряжения 0—10 В. Указатель может использоваться для индикации выходного сигнала аналогового регулирующего блока РБА, интеграторов БПИ и БДП, а также для индикации положения исполнительного механизма при наличии соответствующего датчика положения с унифицированным сигналом.

Блок ручного управления БРУ-ЗК отличается от блока БРУ-У отсутствием указателя.

Блок БРУ-2К имеет всего две кнопки управления  $\triangleleft$  и  $\triangleright$  и используется в качестве двухпозиционного переключателя для коммутации информационных и управляющих цепей.

Блок БРУ-1К имеет одну кнопку управления и две индикаторные лампочки, и используется обычно в качестве устройства вызова по четырем информационным каналам.

**Исполнительные устройства.** В системе АКЭСР могут использоваться те же исполнительные устройства, что и в аппаратуре «Каскад», благодаря унификации выходных сигналов регулирующих блоков. Наиболее рекомендуемым является применение тиристорного пускателя типа ПБР-2-3 и исполнительного механизма типа МЭО-68 производства ЧЗЭИМ. Для шкафного ва-

рианта системы регулирования на аппаратуре АКЭСР разработаны специальные модификации тиристорного пускателя под названием ПБР-2Ш и ПБР-3Ш. При работе регулирующих блоков РБИ на мощные исполнительные механизмы с контактным управлением через магнитные контакторы (например, МКР-0-58 или ПМЕ) последние должны подключаться через тиристорные пускатели.

#### 4.7. Блок регулирующий релейный Р-21

Блок Р-21, как указано выше (см. § 4.1), входит в систему «Каскад» и служит для формирования импульсов управления электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости, в комплекте с которым обеспечивает реализацию ПИ-регулятора релейно-импульсного действия.

Блок Р-21 имеет следующие независимые параметры настройки:

$V_{св}$  — скорость связи, %/с, где проценты берутся от верхнего предела сигнала по соответствующему входу (5 мА, 20 мА или 2,5 В);

$T_{и}$  — постоянная времени интегрирования, с;

$T_{дф}$  — постоянная времени демпфера, с;

$\Delta t_{и}$  — длительность импульсов в пульсирующем режиме, с;

$\Delta_{н}$  — зона нечувствительности, %.

Коэффициент усиления регулятора  $K_p$  (в комплекте с исполнительным механизмом) находится из выражения

$$K_p = S_{экв} / V_{св},$$

где  $S_{экв}$  — эквивалентная скорость исполнительного механизма при заданной длительности импульсов  $\Delta t_{и}$ .

На рис. 4.16 показана функциональная схема блока. Блок содержит входной каскад ВК, операционный усилитель УВ-41, трехпозиционный релейный усилитель мощности УР-2, функциональную (главную) обратную связь ФОС, две вспомогательные обратные связи — отрицательную ООС и положительную ПОС, источник питания ИП-15 и сигнальные лампочки СЛ.

Входная цепь блока Р-21 рассчитана на подключение трех токовых сигналов ( $I_1$  и  $I_3$  в пределах 0— $\pm 5$  мА;  $I_2$  в пределах 0— $\pm 20$  мА) и двух сигналов на-

пряжения ( $U_4$  в пределах  $0 \pm 2,5$  В;  $U_5$  в пределах  $0 \pm 24$  В).

Вход 4 обычно используется для подключения выхода измерительного блока И-04, а вход 5 — для сигнала динамической связи.

Токовые входные сигналы преобразуются в сигналы напряжения с помощью резисторов  $R_1$ — $R_3$  и алгебраи-

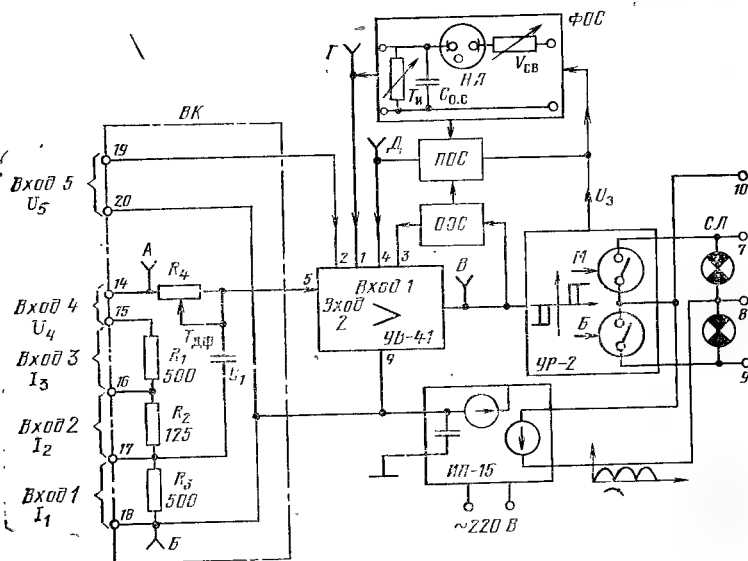


Рис. 4.16. Функциональная схема блока Р-21.

чески суммируются между собой и сигналом  $U_4$  путем последовательного соединения. Полученный суммарный сигнал (сигнал рассогласования) поступает на вход 2 операционного усилителя. Входные сигналы  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $U_4$  при этом демпфируются (сглаживаются) цепочкой  $R_4C_1$ . Недемпфируемый вход 1 блока Р-21 рекомендуется использовать для подключения дифференциатора.

Операционный усилитель УВ-41 обеспечивает суммирование и усиление сигналов, поступающих от входной цепи и обратных связей. Усилитель имеет высокое входное сопротивление (более 100 МОм), необходимость которого связана прежде всего с высоким сопротивлением резисторов в цепи ФОС. Усилитель УВ-41 выполнен по схеме усилителя постоянного тока с управ-

ляемым генератором аналогично рассмотренному выше усилителю УВ-22. В отличие от последнего усилитель УВ-41 является двуполярным: вход рассчитан на сигнал напряжений постоянного тока  $0 \pm 10$  мВ, а выходной сигнал изменяется в пределах  $0 \pm 0,5$  мА при сопротивлении нагрузки 10 кОм. Таким образом, коэффициент усиления УВ-41 по напряжению составляет 500.

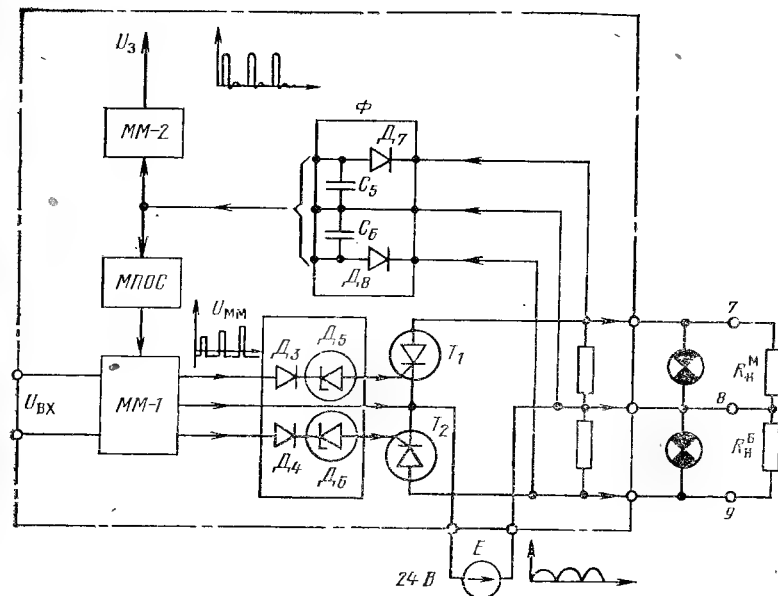


Рис. 4.17. Функциональная схема усилителя УР-2.

Для получения двухполярной статической характеристики, симметричной относительно начала координат, усилитель УВ-41 содержит в цепи обратной связи специальный диодный ключ, который изменяет фазировку обмотки обратной связи с частотой опорного напряжения.

Усилитель релейный УР-2 воспринимает сигнал с выхода усилителя УВ-41 и обеспечивает срабатывание силовых тиристорных ключей, коммутирующих пусковое устройство исполнительного механизма, формируя при этом трехпозиционную характеристику с зоной нечувствительности и зоной возврата. Кроме того, вырабатывает напряжение импульсной формы  $U_3$  для заря-



да цепи обратной связи. Функциональная схема усилителя показана на рис. 4.17.

Релейные свойства усилителя достигаются благодаря тому, что в цепях его нагрузки установлены тиристоры  $T_1$  и  $T_2$ , которые, как известно, обладают двумя устойчивыми состояниями. Тиристоры подключены последовательно с нагрузкой к источнику двухполупериодного неслаженного выпрямленного напряжения  $E$ .

Управление тиристорами осуществляется импульсным напряжением  $U_{м.м.}$ , которое формируется магнитным модулятором ММ-1 под действием входного сигнала постоянного тока от усилителя УВ-41. При достаточной амплитуде импульсов, большей, чем порог включения тиристора, в начале текущего полупериода напряжения питания происходит включение того из тиристоров, на управляющем электроде которого импульс имеет положительную полярность. В конце полупериода питающего напряжения, когда ток нагрузки станет меньше тока выключения тиристора, тиристор отключается. В следующий полупериод этот процесс повторяется.

При изменении направления тока на выходе УВ-41 изменяется полярность управляющих импульсов на выходе ММ-1 и происходит включение другого тиристора, что позволяет получить трехпозиционную релейную характеристику усилителя. Зона нечувствительности усилителя УР-2 определяется напряжением пробоя (напряжением стабилизации) стабилитронов  $D_5$  и  $D_6$  и порогом включения тириستоров  $T_1$  и  $T_2$ .

Зона возврата усилителя УР-2 формируется местной положительной обратной связью МПОС (в виде пропорционального звена), сигнал к которой подается с выхода УР-2 через сглаживающий фильтр  $\Phi$ .

К выходным цепям усилителя через фильтр  $\Phi$  подключен также магнитный модулятор ММ-2. При срабатывании усилителя магнитный модулятор ММ-2 вырабатывает напряжение импульсной формы  $U_3$ , которое подается в цепи заряда обратных связей (ФОС и ПОС), охватывающих прямой канал регулирующего блока.

Импульсная форма напряжения  $U_3$  выбрана для снижения сопротивления резисторов в цепи заряда ФОС.

Операционный усилитель УВ-41 и трехпозиционный релейный усилитель УР-2 образуют прямой канал усиления регулирующего блока с высокоомным входом и тиристорными ключами на выходе, причем зависимость между его входным и выходным сигналами имеет вид трехпозиционной релейной характеристики с зоной нечувствительности и зоной возврата.

Зона нечувствительности блока Р-21 регулируется изменением коэффициента передачи отрицательной об-

ратной связи ООС, представляющей собой пропорциональное звено и охватывающей операционный усилитель УВ-41 (рис. 4.16).

Звено ПОС с изменяемым коэффициентом передачи используется для регулировки зоны возврата релейной характеристики с целью обеспечения желаемой длительности управляющих импульсов регулирующего блока в пульсирующем режиме.

Звено ФОС играет основную роль в формировании закона следования управляющих импульсов и алгоритма регулирования в целом. В блоке Р-21 звено ФОС выполнено в виде нелинейного апериодического звена на RC-элементах, цепи заряда и разряда которого разделяются с помощью неоновой лампочки НЛ. Напомним, что таким путем обеспечивается независимость органов настройки — скорости связи  $V_{св}$ , зависящей от сопротивления резистора в цепи заряда конденсатора  $C_{о.с}$  обратной связи, и постоянной времени интегрирования  $T_{и}$  (зависящей от сопротивления резистора в цепи разряда конденсатора  $C_{о.с}$ ).

В связи с тем, что длительность импульсов определяется отношением зоны возврата к скорости связи  $V_{св}$ , в блоке Р-21 введена автоматическая коррекция коэффициента положительной обратной связи, обеспечивающая увеличение зоны возврата при увеличении  $V_{св}$  и сохранение зоны возврата при изменении зоны нечувствительности, в результате чего длительность импульсов приблизительно сохраняется постоянной. Эта конструкция реализована с помощью соответствующих связей звеньев ПОС с ООС и ФОС (на рис. 4.16 показано стрелками).

Состояние блока контролируется визуально по сигнальным лампочкам СЛ, расположенным на передней панели.

Выходная цепь блока Р-21 содержит два тиристорных ключа (в усилителе УР-2) и источник пульсирующего напряжения 24 В (в источнике питания ИП-15). Выход блока гальванически изолирован от его входов.

Нагрузка подключается по трехпроводной схеме (см. рис. 3.4) и может быть как пассивной, так и активной. В последнем случае нагрузка должна содержать источник, который имеет пульсирующую до нуля форму напряжения, что необходимо для отключения тиристорных ключей.

Если сопротивление нагрузки содержит индуктивную составляющую, то нагрузка (например, магнитный пускатель ПМРТ-69) подключается к блоку Р-21 через блок согласующих приставок В-21, который содержит резистивно-емкостные цепи и обеспечивает прерывание тока нагрузки в конце каждого полупериода напряжения сети.

Конструкция блока Р-21 содержит четыре взаимозаменяемых модуля: модуль динамики, включающий в себя элементы обратных связей и органы настройки и контроля; модуль усилителя постоянного тока УВ-41; модуль релейного усилителя УР-2; модуль источника питания ИП-15.

#### 4.8. Блок регулирующий аналоговый Р-12

Блок Р-12 входит в систему «Каскад» и формирует аналоговый управляющий сигнал в соответствии с П-, ПИ- или ПИД-законом регулирования с ограничением выходного сигнала по максимуму и минимуму и демпфированием (сглаживанием) входного сигнала.

Блок имеет следующие параметры настройки:

$K_p$  — коэффициент пропорциональности (коэффициент усиления регулятора  $K_R$ );

$T_i$  — постоянная времени интегрирования;

$T_d/T_i$  — отношение постоянной времени дифференцирования к постоянной времени интегрирования;

$T_{df}/T_i$  — отношение постоянной времени демпфирования к постоянной времени интегрирования;

$X_{max}$  и  $X_{min}$  — уровни ограничения соответственно по максимуму и минимуму.

На рис. 4.18 показана функциональная схема регулирующего блока Р-12 с блоком управления БУ-12 и блоком указателей В-12.

Блок Р-12 содержит входную цепь 1, операционный усилитель 2 типа УВ-22, модуль ограничения 3, усилитель мощности 4 на базе операционного усилителя УВ-21, корректирующие RC-цепи для формирования закона регулирования ( $R_6, R_7, R_8, R_9, R_{11}, R_{12}, C_1, C_2, C_3$ ), цепи обеспечения безударного переключения с ручного на автоматический режим управления нагрузкой ( $R_4, R_5, R_{10}, R_{13}$ , реле  $P$ ) и источник питания (на схеме не показан).

Входная цепь блока Р-12 обеспечивает алгебраическое суммирование пяти аналоговых входных сигна-

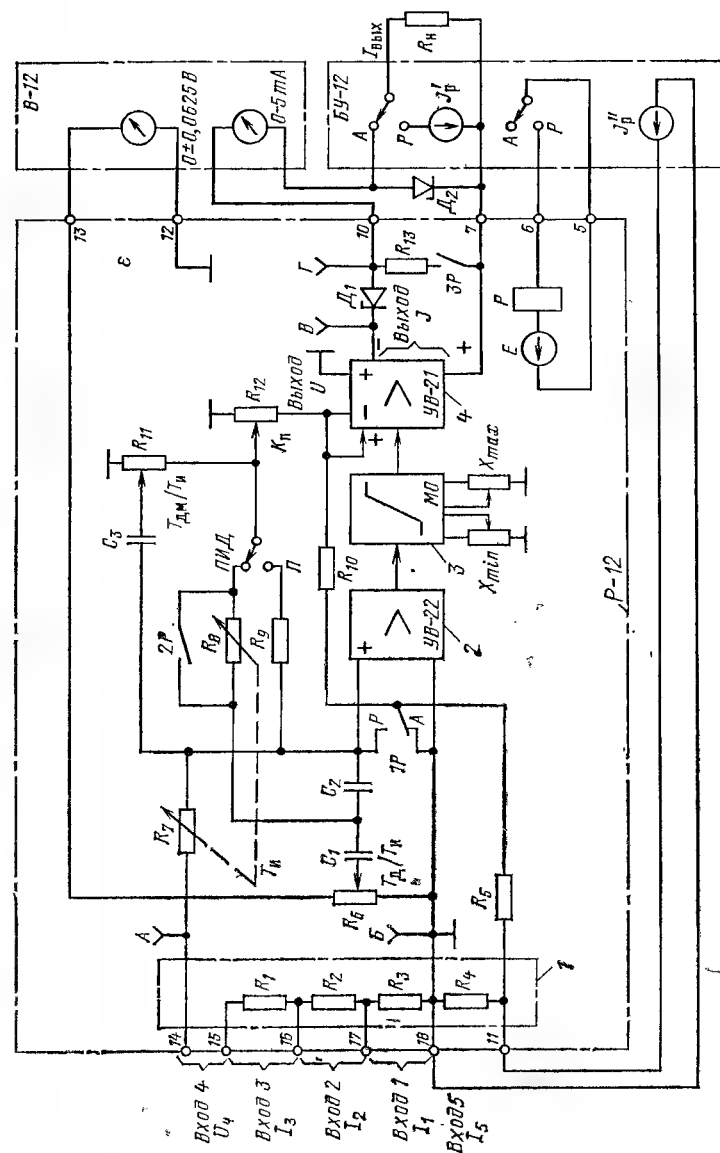


Рис. 4.18. Функциональная схема аналогового регулирующего блока Р-12 с блоком управления БУ-12 и блоком указателей В-12.

лов постоянного тока, причем вход 4 предназначен для подключения сигналов напряжения (выходного сигнала измерительного блока И-04), остальные входы — токовые. Вход 5 является вспомогательным, подключается к источнику задающего сигнала блока управления БУ-12 и используется при ручном дистанционном управлении нагрузкой для обеспечения безударности переключения режима работы.

Токовые входные сигналы преобразуются в сигналы напряжения 0—2,5 В с помощью нагрузочных резисторов  $R_1—R_4$ , причем  $R_1=R_3=R_4=500$  Ом (для сигналов 0—5 мА),  $R_2=125$  Ом (для сигналов 0—20 мА). Далее все основные сигналы алгебраически складываются благодаря тому, что резисторы  $R_1—R_3$  и вход 4 включены последовательно. Все входы при этом оказываются гальванически связанными между собой. В связи с этим источники входных сигналов должны быть гальванически изолированными друг от друга. Для выполнения операции сложения источники сигнала подключаются в одном направлении (плюсом к верхнему зажиму), а для вычитания — в противоположном (плюсом к нижнему зажиму).

Сигнал алгебраической суммы четырех основных входных сигналов (рассогласование) выведен на контрольные гнезда А—Б.

Усилители УВ-22 и УВ-21 вместе с модулем ограничения 3 образуют прямой канал регулирующего блока.

Модуль ограничения (МО) воспринимает выходной токовый сигнал усилителя УВ-22, преобразует его в сигнал напряжения и передает на активном участке своей характеристики с коэффициентом  $K_{м.о}=1$ , а на участках ограничения обеспечивает двустороннее регулируемое ограничение. Модуль МО выполнен на пассивных элементах (резисторах и диодах).

Усилитель УВ-21 используется для обеспечения необходимой мощности выходного сигнала (ток 0—5 мА) и для подачи сигнала напряжения в цепь функциональной обратной связи прямого канала, имеет два гальванически изолированных выхода — основной токовый и дополнительный выход по напряжению.

Усилитель УВ-21 охвачен единичной отрицательной обратной связью и передает сигнал на выход по напряжению с коэффициентом  $K_{у.м}=1$  и на токовый выход с крутизной  $S_{у.м}=1$  мА/В.

При работе на активном участке характеристики МО прямой канал блока Р-12 может рассматриваться как линейный усилитель с большим коэффициентом усиления ( $K_y \gg 1$ ), который обеспечивается усилителем УВ-22.

Формирование закона регулирования в блоке Р-12 производится с помощью корректирующих элементов (пассивных RC-элементов), подключаемых к усилителю прямого канала в его входную цепь и цепь отрицательной обратной связи.

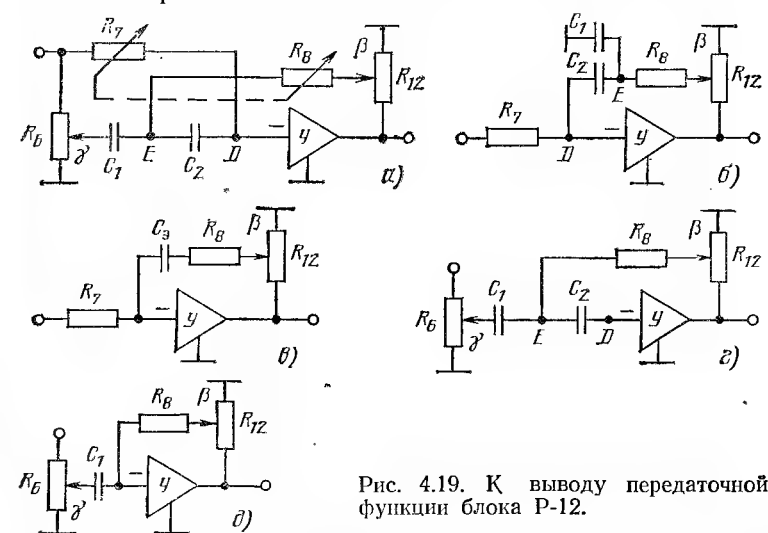


Рис. 4.19. К выводу передаточной функции блока Р-12.

Эквивалентная схема, поясняющая принцип формирования ПИД-алгоритма, приведена на рис. 4.19,а, где У — усилитель прямого канала,  $\gamma$  и  $\beta$  — коэффициенты передачи резистивных делителей  $R_6$  и  $R_{12}$ .

Для упрощения здесь опущена цепь демфера с конденсатором  $C_3$ .

Как видно из рис. 4.19,а, входная цепь усилителя У содержит две параллельные ветви (через резистор  $R_7$  и конденсатор  $C_1$ ), вследствие чего общую передаточную функцию регулирующего блока  $W_{р.б}(p)$  можно разложить на два слагаемых:

$$W_{р.б}(p) = W_1(p) + W_2(p),$$

где  $W_1(p)$  соответствует входной цепи через  $R_7$  (при  $\gamma=0$ );  $W_2(p)$  — входной цепи через  $C_1$  (при отсутствии  $R_7$ ).

Эквивалентная схема для первой из указанных составляющих приведена на рис. 4.19,б.

Так как  $K_y \gg 1$ , то точка D является потенциально заземленной, т. е.  $U_D \approx 0$ . Поэтому можно считать, что обкладки конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  имеют одинаковые потенциалы, т. е.  $C_1$  и  $C_2$  включены па-

параллельно. Эквивалентная схема при этом принимает вид, показанный на рис. 4.19,б, где  $C_8=2C$ , так как  $C_1=C_2=C$ .

Передаточная функция такой системы определяется следующим образом (без учета знака):

$$W_1(p) = \frac{1}{\beta} \frac{z_{o.c}(p)}{z_{bx}(p)} = \frac{1}{\beta} \left( R_8 + \frac{1}{pC_9} \right) / R_7 = \frac{R_8}{\beta R_7} \left( 1 + \frac{1}{2R_8 C p} \right),$$

или

$$W_1(p) = K_{\Pi} \left( 1 + \frac{1}{pT_{\Pi}} \right),$$

где

$$K_{\Pi} = \frac{1}{\beta} \frac{R_8}{R_7}; \quad (4.1)$$

$$T_{\Pi} = 2R_8 C. \quad (4.2)$$

Знак «минус» здесь опущен, так как основной выходной сигнал регулирующего блока Р-12 не инвертируется.

Таким образом, рассмотренная цепь формирует ПИ-составляющую закона регулирования.

Для второй из указанных составляющих эквивалентная схема приведена на рис. 4.19,г. В этой схеме потенциально заземленными являются точки  $E$  и  $D$ , т. е.  $U_E=U_D \approx 0$  (входным током операционного усилителя  $U$  можно пренебречь). Поэтому точки  $E$  и  $D$  можно объединить и представить эквивалентную схему в виде, изображенном на рис. 4.19,д.

Передаточная функция такой схемы соответствует дифференциальной составляющей закона регулирования (знак минус опущен):

$$W_2(p) = \frac{\gamma}{\beta} \frac{z_{o.c}(p)}{z_{bx}(p)} = \frac{\gamma}{\beta} \frac{R_8}{\frac{1}{pC_1}} = \frac{\gamma}{\beta} p R_8 C,$$

или

$$W_2(p) = \frac{1}{\beta} \frac{R_8}{R_7} p (\gamma R_7 C) = K_{\Pi} T_{\Pi} p,$$

где

$$T_{\Pi} = \gamma R_7 C. \quad (4.3)$$

Сложив составляющие  $W_1(p)$  и  $W_2(p)$ , получим общую передаточную функцию регулирующего блока Р-12 (без учета демпфера) в виде ПИД-оператора:

$$W(p) = K_{\Pi} \left( 1 + \frac{1}{pT_{\Pi}} + pT_{\Pi} \right), \quad (4.4)$$

где  $K_{\Pi}$ ,  $T_{\Pi}$ ,  $T_{\Pi}$  определяются формулами (4.1), (4.2) и (4.3).

Значение отношения  $T_{\Pi}/T_{\Pi}$  при этом зависит от коэффициента передачи делителя  $\gamma$  и соотношения резисторов  $R_7$  и  $R_8$ :

$$\frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi}} = \frac{\gamma R_7 C}{2R_8 C} = \frac{\gamma}{2} \frac{R_7}{R_8},$$

причем  $\gamma=0 \div 1$ .

Максимум величины  $T_{\Pi}/T_{\Pi}$  определяется отношением  $R_7/R_8$  и не имеет структурных ограничений. В выпускаемых модификациях блоков Р-12 приняты два варианта для  $(T_{\Pi}/T_{\Pi})_{\max}$ :

$$\left( \frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi}} \right)_{\max}^I = 0,25; \quad \left( \frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi}} \right)_{\max}^{II} = 0,5.$$

В блоке Р-12 параметр  $T_{\Pi}$  регулируется путем изменения резистора  $R_8$ , причем соотношение  $R_7/R_8$  остается постоянным за счет того, что одновременно с  $R_8$  изменяется пропорционально и резистор  $R_7$  (с помощью переключателя на два направления).

Параметр  $K_{\Pi}$  регулируется делителем  $\beta$ , а параметр  $T_{\Pi}/T_{\Pi}$  — делителем  $\gamma$ .

Для получения ПИ-закона регулирования достаточно установить  $\gamma=0$ , т. е.  $T_{\Pi}/T_{\Pi}=0$ .

Для получения П-закона регулирования следует установить делитель  $\gamma$  на нуль (при этом во входной цепи усилителя остается только активное сопротивление  $R_7$ ) и поставить переключатель в положение «П» (при этом в цепь обратной связи усилителя  $U$  включается активное сопротивление  $R_8$ ).

Приведенная выше передаточная функция (4.4) получена без учета цепи с конденсатором  $C_3$ . Можно показать, что наличие  $C_3$  приводит к появлению в  $W_{p.б}(p)$  дополнительного множителя  $1/(pT_{\Pi}+1)$ , что эквивалентно включению апериодического звена (демпфера) последовательно с идеальным ПИД-регулятором. При этом  $T_{\Pi} = \xi R_8 C_3$  и  $T_{\Pi}/T_{\Pi} = \frac{\xi}{2} \frac{C_3}{C}$ , где  $\xi = 0 \div 1$ .

Таким образом, за счет изменения коэффициента передачи резистивного делителя  $R_{11}$  можно регулировать соотношение  $T_{\Pi}/T_{\Pi}$ .

При ручном управлении нагрузкой переключатель река управления БУ-12 устанавливается в положение «». При этом нагрузка  $R_{\Pi}$  отключается от блока Р-12 подсоединяется к регулируемому источнику  $I'_{\Pi}$ , действуя на который оператор вручную устанавливает заданную нагрузку. Одновременно на пятый вход блока Р-12 подается такой же ток от источника  $I'_{\Pi}$ , который управляется синхронно с источником  $I'_{\Pi}$ .

Второй контакт переключателя вызывает срабатывание реле  $P$  блока Р-12. Регулирующий блок по входу 5 превращается при этом в апериодическое звено с малой постоянной времени путем подключения резисторов  $R_5$  и  $R_{10}$  соответственно на вход усилителя и в цепь обратной связи (контактом  $1P$ ), а также замыкания резистора  $R_8$  (контактом  $2P$ ).

Выходной сигнал блока Р-12 практически повторяет сигнал ручного задатчика блока БУ-12, что способствует

Резистор  $R_{13}$  является фиктивной нагрузкой токового выхода усилителя мощности и подключается к нему контактом ЗР при ручном управлении.

Конструктивно блок Р-12 состоит из сборного шасси и сварного корпуса. Сборное шасси объединяет пять функциональных взаимозаменяемых модулей блока:

модуль усилителя постоянного тока УВ-22;

модуль усилителя постоянного тока УВ-21;

Объединение всех модулей осуществляется межмо-

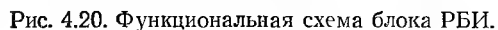
РБИ1 — без дистанционной настройки параметров;

РБИЗ — с аналоговой дистанционной настройкой

В процессе освоения регулирующие блоки комплекса

146

Функциональная схема регулирующего блока типа РБИ (без цепей дистанционной подстройки параметров) показана на рис. 4.20. В целом схема соответствует структуре релейно-импульсного ПИ-регулятора, рассмотренной в гл. 2. Основу схемы составляют суммирующий каскад *СК*, релейный элемент *РЭ* и функциональная обратная связь *ФОС*.



Принципиальная схема блока РБИ в упрощенном виде показана на рис. 4.21.

Формирователь сигнала рассогласования содержит сумматоры  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  и  $\Sigma_3$  и осуществляет вычисление ошибки регулирования по формуле

где  $Y_1 = -(X_{11} + 1,13X_{12})$ ;  $Y_2 = -(X_{21} + 1,13X_{22} + 1,13X_{23})$ .

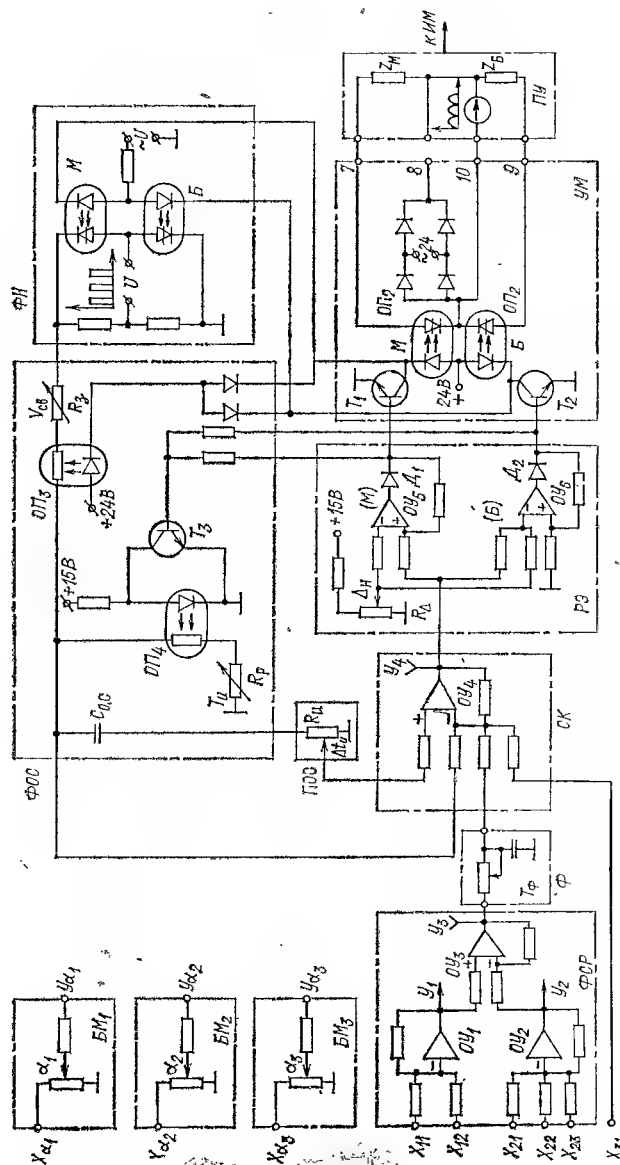


Рис. 4.21. Принципиальная схема блока РБИ.

Входы  $X_{12}$ ,  $X_{22}$  и  $X_{23}$  рассчитаны на подключение к блокам масштабирования. Коэффициенты передачи по этим входам выбраны несколько больше единицы с тем расчетом, чтобы в сочетании с блоками масштабирования БМ результирующие коэффициенты передачи (от входов  $X_a$  к точке  $Y_3$ ) можно было устанавливать плавно в пределах от 0 до 1. Сумматор  $\Sigma_1$  обычно используется для ввода сигнала регулируемой величины, а сумматор  $\Sigma_2$  — для сигнала задания. Сумматоры  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ ,  $\Sigma_3$  выполнены на операционных усилителях  $ОУ_1$ ,  $ОУ_2$ ,  $ОУ_3$  (интегральных микросхемах типа К153УД1А).

Демпфер  $\Phi$  выполняет функцию фильтра по отношению к пульсациям сигнала рассогласования и представляет собой апериодическое пассивное RC-звено с регулируемой постоянной времени  $T_\Phi$  и единичным коэффициентом передачи.

Суммирующий каскад содержит высокоомный сумматор  $\Sigma_4$  и обеспечивает алгебраическое суммирование сигналов, поступающих от демпфера и функциональной обратной связи, а также по входу  $X_{31}$ . Необходимость высокого входного сопротивления сумматора  $\Sigma_4$  определяется в первую очередь высоким выходным сопротивлением цепи функциональной обратной связи, которая выполнена на пассивных RC-элементах. Сумматор  $\Sigma_4$  реализован на высокоомном операционном усилителе  $ОУ_4$  — гибридной интегральной микросхеме К284УД1В с дифференциальным входом на полевых транзисторах.

Релейный элемент реализует характеристику трехпозиционного реле с зоной нечувствительности  $\Delta_n$  и зоной возврата  $\Delta_v$ . Элемент выполнен на операционных усилителях  $ОУ_5$  (канал «Меньше») и  $ОУ_6$  (канал «Больше») — интегральных микросхемах типа К153УД1А.

Необходимые релейные свойства каналов обеспечиваются благодаря высокому коэффициенту усиления и ограничению выходного сигнала операционных усилителей, а также наличию некоторой положительной обратной связи, охватывающей усилители и создающей исходную зону возврата. Зона нечувствительности создается путем подачи на инвертирующие входы усилителей положительного напряжения, которое регулируется переменным резистором  $R_A$  и обеспечивает запирающие диоды  $D_1$ ,  $D_2$  при малом уровне входного сигнала.

Усилитель мощности  $УМ$  предназначен для обеспечения достаточной нагрузочной способности выходных це-

пей регулирующего блока и гальванической развязки их от входных цепей. Усилитель содержит транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ , работающие в ключевом режиме и коммутирующие (при срабатывании релейного элемента) цепи управления оптоэлектронных преобразователей — тиристорных оптронов  $ОП_1$  и  $ОП_2$ . Оптроны обеспечивают коммутацию внешних цепей (пускового устройства  $ПУ$ ) с источником переменного или пульсирующего до нуля тока, а также гальваническое разделение управляющих и силовых цепей.

Выход регулирующего блока может быть активным (с использованием внутреннего источника). В этом случае входная цепь пускового устройства должна быть пассивной, а в качестве средней точки используется зажим 8 (см. рис. 4.20).

Выход РБИ может быть также и пассивным (в виде замыкаемых тиристорных ключей). В этом случае входная цепь пускового устройства должна содержать собственный источник, а в качестве средней точки используется зажим 10 (см. рис. 4.21).

Функциональная обратная связь  $ФОС$  играет основную роль в формировании закона регулирования, в блоках РБИ она выполнена нелинейной, и представляет собой апериодическое звено с разделенными цепями заряда и разряда.

При срабатывании релейного элемента в любую сторону ( $M$  или  $B$ ) замыкается ключ заряда, выполненный на резисторном оптроне  $ОП_3$ . Конденсатор обратной связи  $C_{o.c}$  при этом заряжается через резистор под действием напряжения  $U_3$ . Если же релейный элемент переходит в невозбужденное состояние «0», то замыкается ключ разряда, выполненный на резисторном оптроне  $ОП_4$ , а ключ заряда размыкается. Конденсатор  $C_{o.c}$  при этом разряжается через резистор  $R_p$ .

Разделение цепей заряда и разряда производится в связи с тем, что коэффициент усиления  $K_p$  релейно-импульсного ПИ-регулятора определяется скоростью заряда цепи обратной связи (скоростью связи  $V_{св}$ ):

$$K_p = S_{им} / V_{св},$$

где  $S_{им}$  — скорость исполнительного механизма, а постоянная времени интегрирования  $T_{и}$  численно равна постоянной времени разряда:

$$T_{и} = T_p = R_p C_{o.c}.$$

В результате разделения цепей заряда и разряда установка параметров  $K_p$  и  $T_{и}$  производится независимо — путем изменения резисторов  $R_3$  и  $R_p$  — с помощью переключателей  $V_{св}$  и  $T_{и}$ .

Для уменьшения требуемого зарядного сопротивления  $R_3$  заряд конденсатора  $C_{o.c}$  производится не постоянным током, а последовательностью импульсов с частотой 50 Гц, которые вырабатываются формирователем напряжения  $ФН$ . Полярность заряжающих импульсов зависит от направления срабатывания релейного элемента.

Работа регулирующего блока РБИ в целом происходит в соответствии с принципом действия релейно-импульсного регулятора, рассмотренного в гл. 2. При появлении сигнала рассогласования ( $\varepsilon = Y_3$ ) регулирующий блок формирует на своем выходе управляющие импульсы, скважность которых (относительное время включения) зависит от  $\varepsilon(t)$  таким образом, что перемещение регулирующего органа  $\mu(t)$  в результате включений исполнительного механизма приближается к ПИ-закону регулирования:

$$\mu(t) = K_p \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{T_{и}} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right].$$

Длительность управляющих импульсов  $\Delta t_{и}$  может регулироваться для обеспечения приемлемого эксплуатационного режима регулирующего блока и исполнительного механизма с помощью переменного резистора  $R_{и}$ , напряжение с которого подается на сумматор  $\Sigma_4$  в качестве сигнала положительной обратной связи (ПОС) и влияет на порог отключения релейного элемента. При слишком коротких и частых управляющих импульсах исполнительный механизм не успевает отработать командный сигнал и может быстро выйти из строя, а слишком большое значение  $\Delta t_{и}$  может привести к возникновению переброски — частых периодических переключений релейного элемента от одного направления к другому («Меньше» — «Больше»).

Основным недостатком рассмотренных блоков РБИ является их недостаточная надежность (отказы оптоэлектронных ключей и высокоомного сумматора). Кроме того, в процессе эксплуатации выявились и некоторые



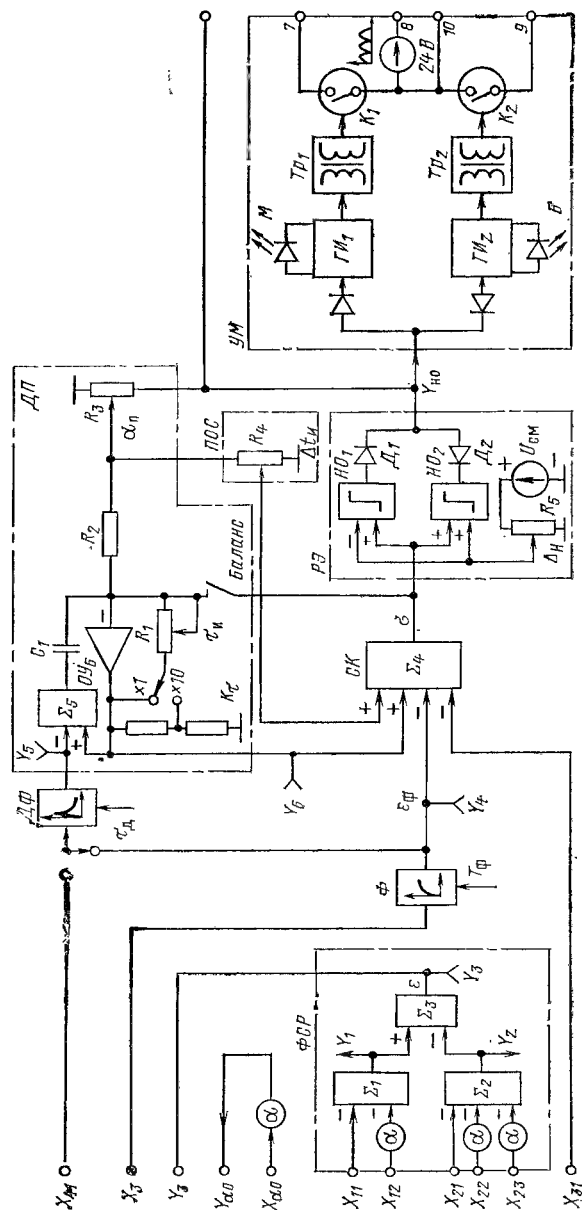


Рис. 4.22. Функциональная схема блока РБИМ.

другие недостатки конструкции блоков РБИ. В связи с этим разработана модернизированная серия блоков, получившая общее название РБИМ.

### Регулирующие блоки РБИМ

Блоки РБИМ в комплекте с исполнительным механизмом постоянной скорости формируют ПИД-закон регулирования с независимой установкой постоянных времени интегрирования и дифференцирования.

Функциональная схема блока РБИМ без цепей дистанционной настройки параметров показана на рис. 4.22. Структурная схема, поясняющая принцип формирования ПИД-закона регулирования, приведена на рис. 4.23.

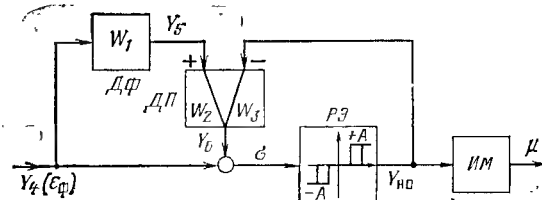


Рис. 4.23. Структурная схема блока РБИМ.

Входная цепь блока РБИМ содержит узел формирования сигнала рассогласования  $\Phi СР$  на сумматорах  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ ,  $\Sigma_3$ , как и в блоке РБИ, но в отличие от последнего имеет большее число (четыре) регулируемых делителей, причем три из них подключены к соответствующим входам сумматоров.

Демпфер  $\Phi$ , предназначенный для фильтрации пульсаций сигнала рассогласования, содержит апериодическое  $RC$ -звено с регулируемой постоянной времени  $T_\Phi$ . В отличие от демпфера блока РБИ демпфер блока РБИМ имеет повторитель сигнала, выполненный на операционном усилителе с высокоомным входом типа 544УД1.

Демпфированный сигнал рассогласования  $\epsilon_\Phi$  поступает на вход суммирующего каскада  $СК$  по двум параллельным ветвям. Одна из них непосредственно соединяет выход демпфера  $\Phi$  с входом  $СК$ . Вторая ветвь содержит дифференциатор  $ДФ$  с передаточной функцией  $W_1(p)$  и канал  $Y_5 \rightarrow Y_6$  с передаточной функцией  $W_2(p)$ . Другой специальный динамический преобразователь  $ДП$ . Дру-

гой канал этого преобразователя  $Y_{но} \rightarrow Y_6$  с передаточной функцией  $W_3(p)$  используется в качестве функциональной обратной связи (ФОС) регулирующего блока.

Передаточные функции  $W_1(p)$  и  $W_2(p)$  соответствуют реально-дифференцирующим звеньям:

$$W_1(p) = \frac{Y_5(p)}{\epsilon_\Phi(p)} = \frac{K_1 T_1 p}{T_1 p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{Y_6(p)}{Y_5(p)} = \frac{T_2 p}{T_2 p + 1}.$$

Передаточная функция функциональной обратной связи  $W_3(p)$  соответствует аperiodическому звену с той же постоянной времени, что и канала  $Y_5 \rightarrow Y_6$ :

$$W_3(p) = \frac{Y_6(p)}{Y_{но}(p)} = \frac{K_3}{T_2 p + 1}.$$

Это обеспечивается благодаря тому, что передаточные функции  $W_2(p)$  и  $W_3(p)$  реализованы на одном операционном усилителе  $OY_6$  с одной и той же обратной связью, содержащей резистор  $R_1$  и конденсатор  $C_1$ .

Постоянная времени  $T_2$  при этом определяется формулой

$$T_2 = K_\tau R_1 C_1,$$

причем резистор  $R_1$  является переменным и выведен на панель органов настройки с гравировкой « $\tau_n$ », а множитель  $K_\tau$  является обратной величиной по отношению к коэффициенту передачи делителя, установленного на выходе  $OY_6$  перед резистором  $R_1$  ( $K_\tau = 1; 10$ ).

Коэффициент передачи  $K_3$  звена ФОС определяется формулой

$$K_3 = K_\alpha K_\tau R_1 / R_2,$$

где  $K_\alpha$  — коэффициент передачи делителя, выполненного на переменном резисторе  $R_3$  с гравировкой « $\alpha_n$ ».

Так как демпфер и функциональная обратная связь реализованы с применением активных элементов (операционных усилителей), отпадает необходимость в высоком входном сопротивлении суммирующего каскада СК, который выполнен в блоке РБИМ на интегральной микросхеме К553УД1А (операционном усилителе).

Дифференциатор ДФ реализован на операционном усилителе с высокоомным входом типа 544УД1.

Формирование требуемой релейной характеристики прямого канала (трехпозиционной с зоной нечувствительности и зоной возврата) производится в блоке

РБИМ с помощью нуль-органов  $HO_1$  и  $HO_2$ , охваченных звеном положительной обратной связи ПОС через сумматор  $\Sigma_4$ . Звено ПОС с регулируемым делителем  $R_4(\Delta t_n)$  используется для регулировки длительности выходных импульсов регулирующего блока за счет изменения зоны возврата релейного элемента РЭ.

Сигнал на вход ПОС подается с выхода делителя  $\alpha_n$ , что обеспечивает пропорциональность между зоной возврата и скоростью сигнала функциональной обратной связи (скоростью связи  $V_{св}$ ). Тем самым достигается независимость длительности импульсов  $\Delta t_n$  от установленного значения  $V_{св}$ , так как  $\Delta t_n = \Delta_n / V_{св}$ .

Зона нечувствительности релейного элемента РЭ регулируется с помощью переменного резистора  $R_5(\Delta_n)$ , с которого снимается напряжение, препятствующее срабатыванию нуль-органов  $HO_1$  и  $HO_2$  в направлении открытия диодов  $D_1$  и  $D_2$ .

Верхний уровень выходного сигнала релейного элемента ( $Y_{но}^+ = +10$  В) формируется с помощью  $HO_1$  и диода  $D_1$ , а нижний уровень ( $Y_{но}^- = -10$  В) — с помощью  $HO_2$  и диода  $D_2$ . Каждый из нуль-органов выполнен на операционном усилителе К553УД1А.

На выходе регулирующего блока установлен усилитель мощности УМ, состоящий из двух идентичных каналов. Каждый из каналов содержит генератор импульсов ГИ, разделительный трансформатор и силовой бесконтактный ключ К, выполненный на одном тиристоре и одном транзисторе.

Генераторы ГИ<sub>1</sub> и ГИ<sub>2</sub> работают в ждущем режиме. При нулевом сигнале релейного элемента  $Y_{но}$  оба генератора находятся в невозбужденном состоянии и ключи  $K_1$  и  $K_2$  закрыты.

При срабатывании первого нуль-органа релейного элемента, т. е. при  $Y_{но} = +10$  В, на выходе генератора ГИ<sub>1</sub> возникает последовательность импульсов, которые вызывают открытие (замыкание) ключа  $K_1$ . Тем самым на выходе блока РБИМ формируется сигнал на включение исполнительного устройства в направлении «Меньше».

Если срабатывает второй нуль-орган релейного элемента, т. е. если  $Y_{но} = -10$  В, то возбуждается генератор ГИ<sub>2</sub>, выходные импульсы которого вызывают открытие ключа  $K_2$ . При этом формируется сигнал на включение исполнительного устройства в направлении «Больше».

Активный выходной сигнал регулирующего блока формируется с использованием внутреннего источника двухполупериодного пульсирующего напряжения 24 В и снимается с зажимом 7—8—9.

Пассивный выходной сигнал в виде состояния ключей  $K_1$  и  $K_2$  снимается с зажимов 7—10—9.

Трансформаторы  $Tr_1$  и  $Tr_2$  обеспечивают гальваническое разделение управляющих и силовых цепей регулирующего блока.

### Анализ динамической структуры блока РБИМ

При отключенном дифференциаторе  $Дф$  динамическая структура блока РБИМ соответствует типовой структуре релейно-импульсного регулирующего блока с линейным апериодическим звеном в цепи функциональной обратной связи. Общая (суммарная) длительность импульсов, формируемых регулирующим блоком, связана с сигналом  $\varepsilon_\Phi$  пропорционально-интегральным алгоритмом функционирования, который записывается по рекомендациям ГОСТ 21693-76 в следующем виде:

$$y(t) = \alpha_n \left[ \varepsilon_\Phi(t) + \frac{1}{\tau_n} \int_0^t \varepsilon_\Phi(t) dt \right],$$

где  $y(t)$  — суммарная длительность импульсов, с;  $\alpha_n$  — коэффициент пропорциональности регулирующего блока, с/%;  $\tau_n$  — постоянная времени интегрирования (ранее обозначалась через  $T_n$ ), с.

Значение  $\tau_n$  равно постоянной времени  $T_2$  апериодического звена  $ФОС$ , т. е.

$$\tau_n = T_2 = K_r R_1 C_1$$

и регулируется плавно переменным резистором  $R_1$  с учетом множителя  $K_r (\times 1; \times 10)$ , устанавливаемого с помощью переключателей на специальной колодке.

С учетом значений  $C_1 = 10,0$  мкФ и  $R_1 = (0,5 \div 5,0)$  МОм легко определить диапазон изменения параметра  $\tau_n$ :

$$\tau_n = \begin{cases} 5 \div 50 \text{ с} & \text{при } K_r = 1 \\ 50 \div 500 \text{ с} & \text{при } K_r = 10. \end{cases}$$

Параметр  $\alpha_n$  связан с ранее используемой величиной  $V_{св}$  (скорость связи) соотношением

$$\alpha_n = 1/V_{св}.$$

Значение  $V_{св}$  определяется выражением

$$V_{св} = AK_3/T_2,$$

где  $A$  — уровень сигнала на входе функциональной обратной связи после срабатывания релейного элемента (для блоков РБИМ значение  $A$  составляет 100% унифицированного сигнала, т. е. 10 В).

Одной из особенностей структуры блока РБИМ является то, что при изменении параметра  $\tau_n$  (воздействием на значения  $R_1$  и  $K_r$ ) параметр  $V_{св}$  и, следовательно,  $\alpha_n$  остаются постоянными, так как  $R_1$  и  $K_r$  в одинаковой степени влияют на  $T_2$  и  $K_3$ :

$$V_{св} = A \left( \frac{K_\alpha K_r R_1}{R_2} \right) / (K_r R_1 C_1) = \frac{AK_\alpha}{R_2 C_1} = f(K_r R_1).$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha_n$  регулирующего блока изменяется плавно за счет изменения коэффициента передачи  $K_\alpha$  делителя, выполненного на переменном резисторе  $R_2$  с гравировкой  $\alpha_n$ :

Таким образом, органы настройки параметров  $\alpha_n$  и  $\tau_n$  являются независимыми.

С учетом связи параметров  $\alpha_n$  и  $V_{св}$  можем записать:

$$\alpha_n = R_2 C_1 / (AK_\alpha).$$

При  $R_2 = 5,0$  МОм;  $C_1 = 10,0$  мкФ;  $A = 100\%$  имеем:

$$\alpha_n = 0,5' K_\alpha.$$

Для крайних значений ( $K_\alpha^{min} = 0,1$ ;  $K_\alpha^{max} = 1,0$ ) получаем диапазон изменения  $\alpha_n$ :

$$\alpha_n = (0,5 \div 5,0) \text{ с/} \%$$

Регулятор, образованный таким регулирующим блоком (без дифференциатора  $Дф$ ) и исполнительным механизмом постоянной скорости, реализует приближенно передаточную функцию ПИ-алгоритма с независимой установкой параметров  $K_n$  и  $\tau_n$ :

$$W_p(p) = K_n \left( 1 + \frac{1}{\tau_n p} \right),$$

причем  $K_n = S_{н.м} \alpha_n$ , где  $K_n$  — коэффициент пропорциональности регулятора, %/%;  $S_{н.м}$  — скорость перемещения регулирующего органа исполнительным механизмом в режиме постоянного включения, %/с.

Если в рассматриваемом блоке включить цепь с дифференциатором  $D\Phi$  (см. рис. 4.23), то на вход суммирующего каскада  $СК$  параллельно с сигналом  $\varepsilon_\Phi$  будет поступать сигнал, прошедший два реально-дифференцирующих звена (дифференциатор  $D\Phi$  и канал  $Y_5 \rightarrow Y_6$  динамического преобразователя  $ДП$ ) с передаточными функциями  $W_1(p)$  и  $W_2(p)$ .

При этом передаточная функция всего регулирующего блока  $W_{p.б}(p)$ , описывающая зависимость суммарной длительности импульсов  $y(t)$  от сигнала  $\varepsilon_\Phi(t)$ , приобретает следующий вид:

$$W_{p.б}(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon_\Phi(p)} = [1 + W_1(p)W_2(p)] \alpha_n \left(1 + \frac{1}{T_2 p}\right).$$

Подставив выражения для  $W_1(p)$  и  $W_2(p)$ , получим:

$$\begin{aligned} W_{p.б}(p) &= \alpha_n \left[ 1 + \frac{K_1 T_1 p}{T_1 p + 1} \frac{T_2 p}{T_2 p + 1} \right] \frac{T_2 p + 1}{T_2 p} = \\ &= \alpha_n \left( 1 + \frac{1}{T_2 p} + K_1 T_1 p \frac{1}{T_1 p + 1} \right), \end{aligned}$$

или

$$W_{p.б}(p) = \alpha_n \left( 1 + \frac{1}{\tau_n p} + \tau_d p \frac{1}{T_1 p + 1} \right),$$

где  $\tau_d = K_1 T_1$ .

Полученное выражение для  $W_{p.б}(p)$  отличается от передаточной функции стандартного ПИД-алгоритма наличием в дифференциальной составляющей балластного множителя  $W_6(p) = 1/(T_1 p + 1)$ , соответствующего апериодическому звену с постоянной времени  $T_1$ , которое играет роль дополнительного демпфера и служит для повышения помехоустойчивости регулирующего блока. В блоке РБИМ отношение  $\tau_d/T_1$  равно  $K_1$  и составляет около 5. Следует отметить также, что при оптимальной настройке для резонансной частоты системы обычно выполняется условие  $\omega_{рез} \tau_d \leq 0,5$ .

При этом  $\omega_{рез} T_1 = (\omega_{рез} \tau_d) \frac{T_1}{\tau_d} \ll 1$ , т. е. влиянием балластного звена в первом приближении можно пренебречь.

Таким образом, можно считать, что регулирующий блок РБИМ с исполнительным механизмом постоянной скорости реализует ПИД-закон регулирования.

Постоянная времени дифференцирования ( $\tau_d = K_1 T_1$ ) при этом устанавливается независимо от постоянной времени интегрирования  $\tau_n$  с помощью соответствующего

органа настройки дифференциатора  $D\Phi$  (путем изменения  $T_1$ ).

Независимость параметров  $\tau_d$  и  $\tau_n$  достигается благодаря тому, что звено с передаточной функцией  $W_2(p)$ , включенное последовательно с дифференциатором  $D\Phi$ , реализует оператор, обратный относительно ПИ-составляющей закона регулирования, причем тождественное равенство постоянных времени оператора  $W_2(p)$  и функциональной обратной связи  $W_3(p)$  обеспечивается за счет реализации  $W_2(p)$  и  $W_3(p)$  на одном операционном усилителе  $ОУ_6$ .

В блоке РБИМ предусмотрена возможность его оперативной балансировки на текущее значение регулируемой величины для безударного перевода системы из режима дистанционного управления в автоматический режим. Это производится путем замыкания контактов «Баланс», в результате чего выход сумматора  $\Sigma_4$  соединяется с входом операционного усилителя  $ОУ_6$  функциональной обратной связи.

Конденсатор  $C_1$  при этом быстро заряжается до такого напряжения, при котором сигнал на входе  $ОУ_6$  (т. е. на выходе  $\Sigma_4$ ) практически равен нулю независимо от текущего значения регулируемой величины и сигнала задания. После перевода системы в автоматический режим и размыкания контактов «Баланс» конденсатор  $C_1$  постепенно разряжается с постоянной времени  $T_2 = \tau_n$  и регулируемый блок вступает в работу, обеспечивая плавное возвращение регулируемой величины к заданному значению, определяемому сигналом задатчика.

#### Работа блока РБИМ с дискретной дистанционной настройкой параметров

На рис. 4.24,а показана структурная схема дискретной трехступенчатой настройки параметров для блока РБИМ2М, осуществляемая с помощью модуля МАПД, включенного в цепь функциональной обратной связи блока. Модуль позволяет установить одну из трех комбинаций параметров  $\alpha_n$  и  $\tau_n$  подачей внешнего управляющего логического сигнала и содержит схему управления СУ и три пары ключей, с помощью которых в цепь ФОС включается одна из трех пар делителей напряжения  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  ( $i = I, II, III$ ). Управляющие входы каждой пары ключей соединены с одним из трех выходов схемы управления СУ.

На схему управления по двум входам  $P_2$  и  $P_3$  поступают внешние логические сигналы управления 1, 0, представляющие собой состояние внешних ключей, подсоединенных между этими входами и общей точкой. Замкнутому состоянию ключей соответствует логический сигнал 1, разомкнутому — 0. Каждому сочетанию входных сигналов схемы управления соответствует сигнал на одном из трех ее выходов.

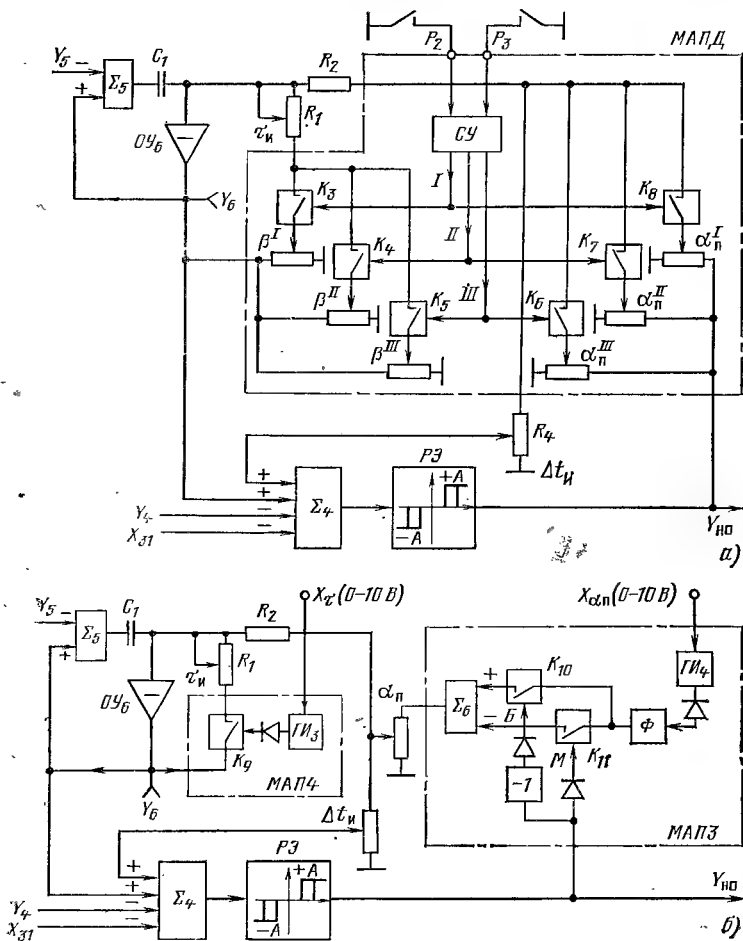


Рис. 4.24. Схема дистанционной настройки параметров в блоках РБИМ.

а — дискретная настройка; б — аналоговая настройка.

Если ни один из входов  $P_2$  или  $P_3$  не соединен с общей точкой, то на первом выходе схемы управления возникает сигнал, замыкающий первую пару ключей  $K_3, K_8$ . При этом напряжение на вход апериодического звена функциональной обратной связи подается через делитель  $\alpha^I_n$ , а в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя  $OY_6$  последовательно с резистором  $R_1$  ( $\tau_n$ ) включается делитель  $\beta^I$ . Коэффициент пропорциональности регулирующего блока при этом определяется делителем  $\alpha^I_n$ , а постоянная времени интегрирования принимает значение  $\tau^I_n$ , определяемое соотношением

$$\tau^I_n = \beta^I \tau_n,$$

где  $\beta^I$  — коэффициент, устанавливаемый по шкале делителя  $\beta^I$ ;  $\tau_n$  — значение постоянной времени интегрирования, устанавливаемое по шкале резистора  $\tau_n$ .

Если соединить с общей точкой вход  $P_2$ , то управляющий сигнал возникает на втором выходе схемы управления, вследствие чего замыкаются ключи  $K_4$  и  $K_7$ , с помощью которых устанавливается новая комбинация параметров настройки  $\alpha^{II}_n$  и  $\tau^{II}_n = \beta^{II} \tau_n$ .

При соединении входа  $P_3$  с общей точкой замыкаются ключи  $K_5$  и  $K_6$  и устанавливается третья комбинация параметров настройки  $\alpha^{III}_n$  и  $\tau^{III}_n = \beta^{III} \tau_n$ .

Схема управления выполнена с применением диодов и транзисторов, а ключи  $K_3$ — $K_8$  — на оптоэлектронных преобразователях (резисторных оптронах, содержащих светодиод и фоторезистор), обеспечивающих гальваническое разделение цепей управления и исполнительных цепей.

#### Работа блока РБИМ с аналоговой дистанционной настройкой параметров

На рис. 4.24,б показана структурная схема аналоговой дистанционной настройки параметров  $\alpha_n$  и  $\tau_n$  для блока РБИ-ЗМ, осуществляемая с помощью модулей МАП-3 и МАП-4.

Модуль МАП-3 обеспечивает аналоговую настройку коэффициента пропорциональности  $\alpha_n$  и содержит управляемый генератор импульсов  $ГИ_4$ , сглаживающий фильтр  $\Phi$ , ключи  $K_{10}, K_{11}$  и сумматор  $\Sigma_6$ . Аналоговый сигнал настройки  $X_{\alpha n}$ , изменяющийся в диапазоне 0—

10 В, подается на вход генератора  $ГИ_4$ . На его выходе формируется последовательность импульсов с амплитудой 10 В и скважностью (относительным временем включения), изменяющейся по закону

$$\gamma_{ап} = \frac{1}{1 + 0,9x_{ап}},$$

где  $x_{ап}$  — сигнал аналоговой настройки [коэффициента  $\alpha_{п}$ , В].

На выходе фильтра  $\Phi$  выделяется средняя составляющая однополярного (отрицательного) импульсного сигнала, равная  $U = \frac{-10}{1 + 0,9x_{ап}}$ . Далее сигнал поступает на

вход апериодического звена цепи функциональной обратной связи регулирующего блока через ключ  $K_{11}$  (или через ключ  $K_{11}$ ) и сумматор  $\Sigma_6$ .

Полярность сигнала на выходе сумматора  $\Sigma_6$  совпадает с полярностью сигнала  $Y_{по}$  релейного элемента  $РЭ$ . Это обеспечивается благодаря тому, что при положительном знаке  $Y_{по}$  замыкается ключ  $K_{11}$  и выход фильтра соединяется с инвертирующим входом сумматора  $\Sigma_6$ , а при отрицательном — замыкается ключ  $K_{10}$  и выход фильтра подключается к неинвертирующему входу этого сумматора.

Таким образом, напряжение, подаваемое на вход  $\Phi ОС$  и, следовательно, скорость связи  $Y_{св}$  обратно пропорционально зависят от управляющего сигнала  $X_{ап}$ .

С другой стороны, коэффициент пропорциональности регулирующего блока  $\alpha_{п}$  есть величина, обратная по отношению к  $V_{св}$ . Благодаря этому зависимость между  $\alpha_{п}$  и  $X_{ап}$  оказывается линейной:

$$\alpha_{п} = \alpha_{п0} (1 + 0,9X_{ап}),$$

где  $\alpha_{п0}$  — значение коэффициента пропорциональности, установленное по шкале делителя  $\alpha_{п}$ .

При изменении аналогового сигнала настройки  $X_{ап}$  в диапазоне от 0 до 10 В коэффициент пропорциональности  $\alpha_{п}$  линейно возрастает от  $\alpha_{п0}$  до  $10\alpha_{п0}$ .

Дистанционная аналоговая подстройка постоянной времени интегрирования  $\tau_{и}$  производится с помощью модуля МАП-4, который содержит управляемый генератор импульсов  $ГИ_3$  и ключ  $K_9$ . Аналоговый сигнал настрой-

ки, изменяющийся в диапазоне 0—10 В, поступает на вход генератора  $ГИ_3$ . На его выходе при этом формируется последовательность импульсов с амплитудой 10 В и скважностью, изменяющейся по закону

$$\gamma_{т} = \frac{1}{1 + 0,9X_{т}},$$

где  $X_{т}$  — сигнал аналоговой дистанционной настройки  $\tau_{и}$ , В. Этот сигнал управляет ключом  $K_9$ , прерывающим (в паузах) цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя  $ОУ_6$ , что приводит к увеличению постоянной времени интегрирования  $\tau_{и}$  обратно пропорционально скважности импульсов, т. е.

$$\tau_{и} = \tau_{и0} (1 + 0,9X_{т}),$$

где  $\tau_{и0}$  — значение постоянной времени интегрирования, установленное по шкале органа настройки  $\tau_{и}$ .

Таким образом, при изменении аналогового сигнала настройки  $X_{т}$  в диапазоне от 0 до 10 В постоянная времени интегрирования линейно возрастает от  $\tau_{и0}$  до  $10\tau_{и0}$ .

## Глава пятая

### ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

#### 5.1. Обзор развития технических средств пневмоавтоматики

Пневмоавтоматика охватывает технические средства регулирования и управления, использующие в работе различные эффекты газовой динамики. Носителем сигналов в устройствах пневмоавтоматики является давление сжатого воздуха, изменяющееся в стандартном диапазоне 0,02—0,1 МПа. В историческом развитии технических средств пневмоавтоматики можно проследить четыре поколения.

Первое поколение — универсальные регуляторы приборного типа. До 40-х годов главной задачей автоматизации являлась стабилизация отдельных параметров — давления, расхода, температуры и пр. С этой задачей успешно справлялись регуляторы, в которых в едином корпусе совмещались измерительная система,

показывающее, регистрирующее, задающее и регулирующее устройства. Объединение всех функций в единой конструкции являлось по тем временам их достоинством, так как существенно упростились монтаж и обелуживание. Основной недостаток универсальных регуляторов — узкие функциональные возможности, ограничивающие их применение. Модификации таких регуляторов, выполненных на современной элементной базе, можно встретить и в настоящее время (например, малогабаритное пневматическое регулирующее устройство

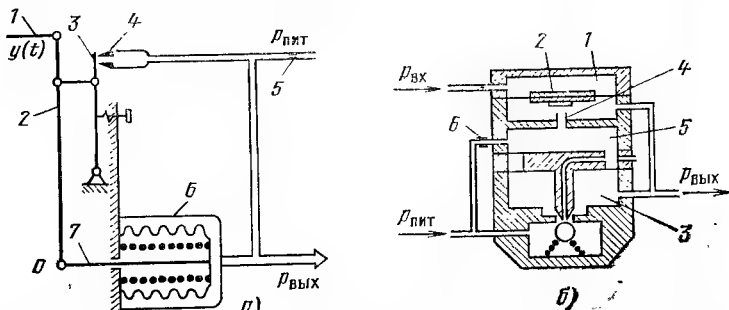


Рис. 5.1. Схемы устройств, работающих по принципу компенсации перемещений (а) и компенсации усилий (б).

ПР3.27М, встраиваемое в электронные самопишущие приборы типа КС-4). Подобные регуляторы работают по принципу компенсации перемещений, в соответствии с которым перемещение, поступающее на вход устройства, компенсируется перемещением, создаваемым давлением воздуха на выходе. В качестве примера, поясняющего этот принцип, рассматривается схема пневматического П-регулятора (рис. 5.1, а).

Изменение регулируемой величины  $y(t)$  преобразуется в перемещение тяги 1. Через рычаг 2, поворачивающийся вокруг опоры О, перемещение передается заслонке 3, что приводит к изменению зазора между ней и соплом 4. Сигнал  $P_{пит}$ , поступающий в линию сопла через постоянный дроссель 5, проходит на выход регулятора. Одновременно давление  $P_{вых}$  поступает в пропорциональное перемещению штока 7, влияющего на зазор между соплом и заслонкой. При этом, если изменение  $y(t)$ , например, привело к прикрыванию сопла заслонкой, то вызванное этим увеличение давления  $P_{вых}$  приведет через сильфон 6 к открыванию сопла, другими словами, — к компенсации перемещения, вызванного входным сигналом. Таким образом, пропорционально входному перемещению заслонки на выходе устройства формируется сигнал давления.

Развитие промышленности, сопровождающееся усложнением технологических процессов, привело к необходимости создавать многоконтурные и многосвязные системы регулирования. Эти требования и определили направление развития пневмоавтоматики второго поколения.

Второе поколение — регуляторы, реализующие агрегатную структуру по принципу компенсации усилий. В 50-х годах стал широко применяться агрегатный принцип построения пневмоавтоматики, согласно которому системы управления комплектовались из стандартных блоков и устройств, выполнявших определенные функции: измерение, регистрацию, установку задания, формирование регулирующего воздействия, суммирование, умножение на постоянный коэффициент и пр. В СССР первая система средств, реализующая агрегатный принцип, известна как агрегатная унифицированная система (АУС).

В набор АУС входили регулирующие блоки, задатчики, вычислительные блоки, преобразователи и вторичные приборы — показывающие и регистрирующие. Регулирующие и функциональные блоки АУС представляли собой единую жесткую конструкцию, состоящую из однотипных цилиндрических шайб с проложенными между ними мембранами из прорезиненного полотна, и работали по принципу компенсации усилий. Усилие, поступающее на вход устройства, компенсировалось усилием, создаваемым давлением воздуха на выходе. Между собой, а также с входными и выходными штуцерами камеры соединялись каналами, проходящими в стенках шайб. Весь набор шайб скреплялся стяжными шпильками.

Принцип компенсации усилий в отличие от принципа компенсации перемещений позволил строить регулирующие и функциональные блоки так, что их работа практически не сопровождалась механическими перемещениями. В качестве примера рассматривается схема повторителя пневматического сигнала, являющегося составной частью большинства блоков АУС (рис. 5.1, б).

Входной сигнал  $P_{вх}$  подается в камеру 1 и развивает на мембране 2 пропорциональное усилие, направленное вниз. На эту же мембрану действует снизу усилие, развиваемое выходным давлением  $P_{вых}$  в камере 3. Под действием разности давлений мембрана 2 прогибается и прикрывает сопло 4. В результате давление в камере



б, куда непрерывно поступает воздух из линии питания через дроссель б, увеличится, восстанавливая равновесие усилий на мембране.

Благодаря высокой чувствительности элемента «солло-заслонка» устройство действует почти без механических перемещений (достаточно мембране прогнуться на несколько микрон, чтобы равновесие усилий было восстановлено).

Агрегатная унифицированная система (АУС) считается одной из первых систем технических средств автоматизации в рамках ГСИ.

Входные и выходные параметры блоков АУС стандартизованы и представляют собой давления сжатого воздуха, изменяющиеся в стандартном диапазоне 0,02—0,1 МПа, что дает возможность набирать блоки в любых сочетаниях и количествах. Блоки АУС взаимозаменяемы, просты в обслуживании и могут работать с любыми измерительными преобразователями (датчиками), имеющими стандартный пневматический выходной сигнал.

**Третье поколение — универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА).** Дальнейшее развитие промышленности привело к необходимости решать средствами пневмоавтоматики более широкий круг задач. Для их решения стало необходимым располагать как аналоговой, так и дискретной техникой. Обычная номенклатура пневматических блоков АУС не удовлетворяла этим требованиям.

Для построения систем пневмоавтоматики в 60-х годах в СССР стал широко использоваться элементный и блочно-модульный принцип. При этом любое новое устройство пневмоавтоматики собиралось путем коммутации пневмоэлементов универсального назначения. Идея элементного построения устройств промышленной пневмоавтоматики нашла воплощение в универсальной системе элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА). Элементы системы унифицированы; однотипные элементы могут многократно применяться в одной схеме и в схемах различных приборов. Набор элементов УСЭППА является функционально полным, т. е. включает в себя элементы, достаточные для построения любого управляющего устройства непрерывного действия, любой релейной схемы и любого управляющего устройства непрерывно-дискретного действия. Функциональные возможности УСЭППА настолько широки, что позволяют не только реализовать все извест-

ные функции управления, но и создавать новые, ранее для пневмоавтоматики вообще недоступные: непрерывно-дискретные регуляторы, сложные релейные схемы, системы централизованного контроля и управления, системы автоматической оптимизации.

Элементы УСЭППА просты по конструкции и по технологии изготовления и сравнительно компактны. Это связано с тем, что каждый элемент в системе выполняет простейшую функциональную операцию. Такие элементы достаточно дешевы, просты в наладке и имеют унифицированное расположение входов и выходов. Монтаж устройств осуществляется посредством набора монтажных плат, выполненных из органического стекла, на которых печатным способом наносятся пневматические каналы. Связь между элементами осуществляется через отверстия в ножках и каналы в платах. Диапазон изменения сигналов стандартный 0,02—0,1 МПа. В качестве дискретных сигналов приняты 0 и 0,14 МПа (условно 0 и 1). Давление питания  $p_{пит} = 0,14$  МПа с допустимым отклонением  $\pm 10\%$  от номинального.

Принцип действия большинства элементов УСЭППА, также как и блоков АУС, основан на компенсации усилий при малых механических перемещениях подвижных деталей (мембран) и более подробно рассмотрен в § 5.3.

**Четвертое поколение — струйная пневмоавтоматика (пневмоника).** Дальнейшее развитие пневмоавтоматики привело к созданию струйного принципа построения элементов и модулей. В качестве носителя энергии в струйных элементах используется воздух, в связи с чем струйную технику называли пневмоникой.

Элементы пневмоники обладают высоким быстродействием и малыми габаритами. Элементы не содержат подвижных изнашивающихся частей. Большое значение имеет и тот факт, что для изготовления элементов пневмоники предложен технологический метод, аналогичный используемому в электронике методу печатного монтажа. По этому методу струйные элементы и коммутации между ними получают в виде углублений в плоских пластинах, что дает возможность использовать такие высокопроизводительные процессы, как штамповка, пресс-литье, фототравление. На базе пневмоники представляется возможным реализовать узлы цифровой техники, такие как сумматор, триггер, сдвигающий регистр.

Любой струйный элемент представляет собой совокупность обладающих определенной формой и определенным образом взаимно ориентированных каналов, по которым протекают потоки воздуха. При этом используются известные гидромеханические эффекты:

а) эффект турбулизации струи: если  $p_{упр}=0$  (рис. 5.2,а), то ламинарная струя питания  $p_{пит}$  поступает в приемное сопло. При этом в приемном сопле устанавливается давление  $p_{вых}\approx 1$ . При  $p_{упр}\neq 0$  (рис. 5.2,б) струя, вытекающая из сопла питания, турбулизируется и давление в приемном сопле  $p_{вых}$  падает до величины, близкой к нулю ( $p_{вых}\approx 0$ );

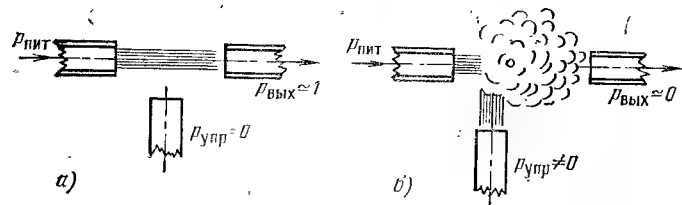


Рис. 5.2. Эффект турбулизации струи.  
а — ламинарная струя; б — турбулентная струя.

б) эффект притяжения струи к стенке (эффект Коанда, рис. 5.3): струя рабочей среды, вытекающая из сопла питания 1 под углом к стенке 2, касается ее в некоторой точке и эжектирует воздух из зоны, ограниченной струей и стенкой. В результате в этой зоне создается пониженное давление и струя подсасывается к стенке (рис. 5.3,а). Если на уровне стенки установить приемное сопло (рис. 5.3,б). Если на уровне стенки установить приемное сопло

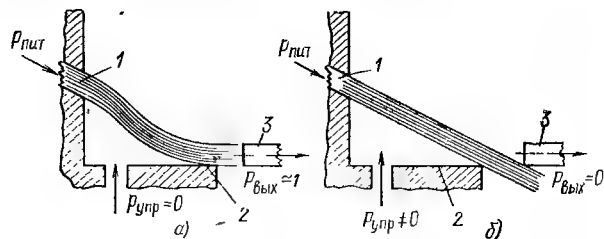


Рис. 5.3. Эффект притяжения струи.  
а —  $p_{упр}=0$ ; б —  $p_{упр}\neq 0$ .

3, то в нем при  $p_{упр}=0$  возникает давление  $p_{вых}\approx 1$ . При подаче  $p_{упр}\neq 0$  (рис. 5.3,б) и по мере его увеличения струя выходит за пределы стенки и давление в приемном сопле 3 исчезнет;

в) эффект взаимодействия струй: струи  $p_{пит}$  и  $p_{упр}$ , взаимодействуя между собой, создают третью струю, не совпадающую с ними (рис. 5.4). Если на пути третьей струи расположить приемное сопло, то давление  $p_{вых}$  будет изменяться в соответствии с графиком на рис. 5.5.

Ниже рассмотрены примеры дискретных элементов, использующих эффект притяжения струи.

На рис. 5.6,а приведена схема элемента, на котором можно получить релейную характеристику. Струя сопла 1 в соответствии с эффектом притяжения протекает вдоль стенки 4, и при отсутствии управляющего сигнала давление на выходе сопла 3 равно нулю. При увеличении давления  $p_{упр}$  в управляющем канале 2 происходит отрыв потока от стенки и струя попадает в приемное сопло 3. Получается типовая релейная характеристика (рис. 5.6,б).

Чтобы превратить элемент в инверсный, достаточно расположить приемный канал, как показано на рис. 5.6,в. Характеристика такого элемента представлена на рис. 5.6,г.

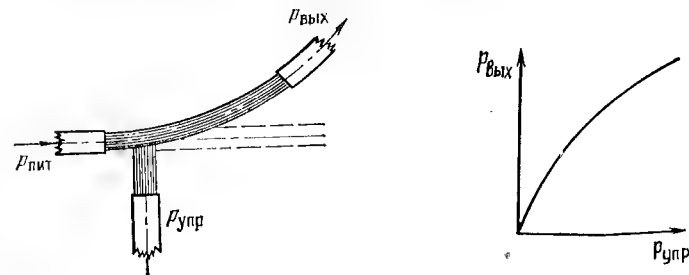


Рис. 5.4. Эффект взаимодействия струй.

Рис. 5.5. Характеристика элемента, использующего эффект взаимодействия струй.

Схемы, реализованные на элементах струйной техники, имеют небольшие габариты и обладают значительно большим быстродействием, чем схемы, построенные на мембранных элементах. Однако широкое внедрение струйных элементов в промышленность затрудняется, во-

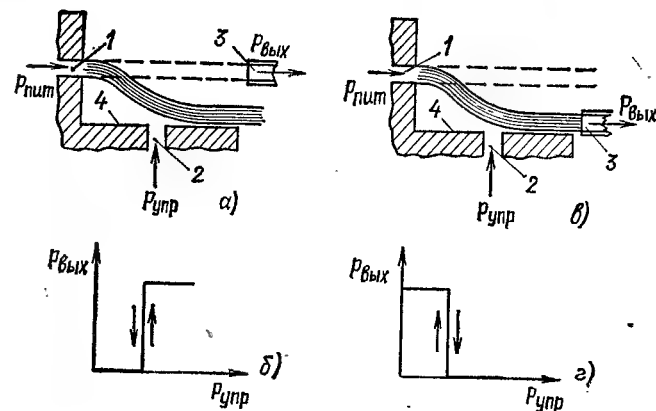


Рис. 5.6. Дискретные элементы, использующие эффект притяжения струи.  
а, в — схемы элементов; б, г — характеристики элементов.

первых, из-за низкого уровня входных и выходных сигналов, во-вторых, из-за невысокой помехоустойчивости. Чтобы использовать положительные качества струйных элементов и избежать отрицательных, применяют комбинированную струйно-мембранную технику. Основные функции системы реализуются на быстродействующих и малогабаритных струйных элементах, а на выходе системы устанавливают мембранные усилители, усиливающие выходной сигнал как по давлению, так и по мощности.

## 5.2. Измерительные преобразователи для схем регулирования на пневмоавтоматике

Измерительные преобразователи с пневматическим устройством дистанционной передачи показаний предназначены для непрерывного преобразования текущих

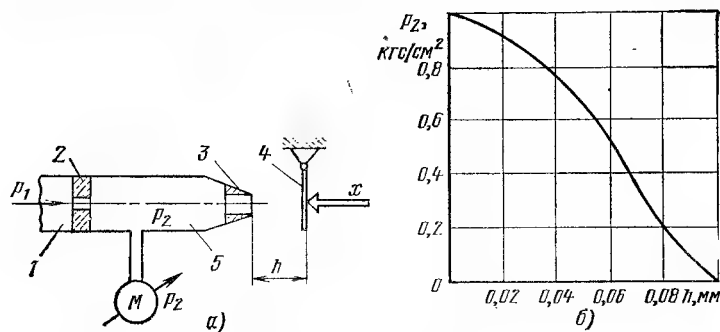


Рис. 5.7. Пневмопреобразователь «сопло-заслонка» (а) и его характеристика (б).

значений контролируемой (регулируемой) величины в выходной пневматический сигнал.

В современных измерительных пневматических преобразователях основным элементом является преобразователь типа «сопло-заслонка» (рис. 5.7, а), работающий по принципу компенсации перемещений.

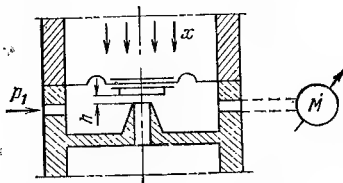


Рис. 5.8. Пневмопреобразователь с закрытым соплом.

В трубку 1 небольшого диаметра непрерывно поступает воздух под давлением  $p_1$  и, пройдя через дроссель постоянного сечения 2, выходит в атмосферу через

сопло 3, перед которым находится заслонка 4. Если изменять зазор  $h$  между соплом и заслонкой, то давление  $p_2$  в междроссельном пространстве будет также изменяться. Статистическая характеристика устройства «сопло-заслонка» показана на рис. 5.7, б.

Характерной особенностью рассмотренного преобразователя является то, что сжатый воздух из проточной камеры 5 выходит через сопло 3 в атмосферу. При этом сопло и заслонка находятся снаружи проточной камеры. Такое сопло называют открытым, а пневмопреобразователь — с открытым соплом.

Существуют преобразователи, у которых сопло и заслонка находятся внутри проточной камеры — пневмопреобразователи с закрытым соплом (рис. 5.8).

Преобразователи, представленные на рис. 5.7 и 5.8, не имеют обратной связи, что затрудняет их работу при наличии вибраций, люфтов и колебаний давления питания. Поэтому обычно преобразователи такого типа снабжаются отрицательной обратной связью (рис. 5.9).

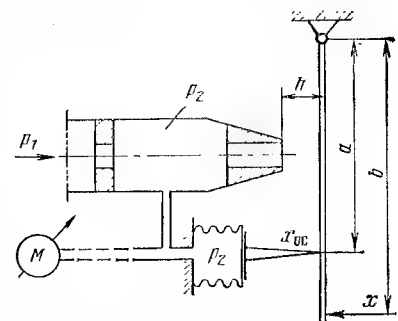


Рис. 5.9. Пневмопреобразователь с отрицательной обратной связью.

При равновесном состоянии заслонки выполняется условие

$$ax_{0.c} = bx \quad (5.1)$$

(при этом усилие струи, действующее на заслонку, не учитывается), где  $x_{0.c} = p_2 f$  — усилие отрицательной обратной связи, действующей на заслонку.

Тогда:

$$p_2 = \frac{b}{af} x = kx, \quad (5.2)$$

где  $k = \frac{b}{af}$  — коэффициент пропорциональности между

входным воздействием  $x$  и выходным давлением  $p_2$ .

В области низких частот преобразователь можно считать пропорциональным звеном с передаточной функцией  $W(p) = k$ . Перемещение заслонки  $h$  под действием входного сигнала  $x$  невелико и составляет 0,02—0,05 мм. Преобразование такого незначительного перемещения в пропорциональный пневматический сигнал осуществляется компенсационным методом.

Пневматическая ветвь системы унифицированных измерительных преобразователей ГСП объединяет приборы для измерения абсолютного, избыточного и вакуумметрического давления (разрежения), перепада давления, температуры, расхода жидких и газовых сред,

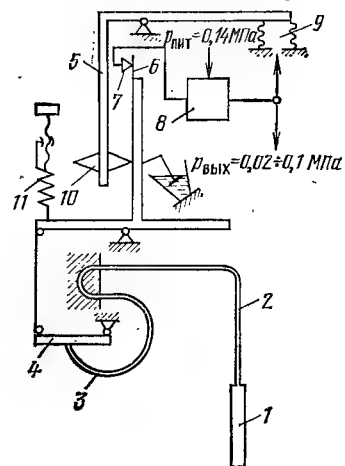


Рис. 5.10. Принципиальная схема манометрического термометра.

уровня, плотности и вязкости жидких сред, механического усилия и числа оборотов.

Современные пневматические преобразователи ГСП работают на принципе силовой компенсации. Класс точности таких приборов, как правило, 0,6 или 1. При этом вариация выходного сигнала не превышает  $\pm 0,3$  или  $\pm 0,5\%$ , а порог чувствительности лежит в пределах 0,05% от диапазона измерения. Допускаемая температура окружающей среды в зависимости от исполнения  $5-50^\circ\text{C}$  или  $-50 \div +50^\circ\text{C}$ . Дополнитель-

ная температурная погрешность на изменение температуры  $\pm 10^\circ\text{C}$  не выше  $\pm 0,25\%$ .

Технические характеристики основных измерительных преобразователей пневматической ветви ГСП приведены в табл. 5.1.

На рис. 5.10 в качестве примера приведена принципиальная схема манометрических термометров ТДЖ-П и ТДГ-П, предназначенных для непрерывного преобразования температуры газа, пара или жидкости в пневматический сигнал дистанционной передачи.

Таблица 5.1. Технические характеристики измерительных преобразователей пневматической ветви ГСП

| Наименование измерительного преобразователя | Тип измерительного преобразователя | Пределы измерений                                                                                   |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Напоромеры сильфонные                       | НС-П                               | $(0-40) \div (0-4000)$ кгс/м <sup>2</sup>                                                           |
| Манометры сильфонные                        | МС-П                               | $(0-0,4) \div (0-25)$ кгс/см <sup>2</sup>                                                           |
| Манометры пружинные                         | МП-П                               | $(0-40) \div (0-1000)$ кгс/см <sup>2</sup>                                                          |
| Манометры сверхвысокого давления            | МСв-П                              | $(0-1000) \div (0-10\,000)$ кгс/см <sup>2</sup>                                                     |
| Тягомеры сильфонные                         | ТС-П                               | $(0-40) \div (0-4000)$ кгс/м <sup>2</sup>                                                           |
| Тягонапоромеры сильфонные                   | ТНС-П                              | $(-20 \div 0 \div +20) \div (-2000 \div 0 \div +2000)$ кгс/м <sup>2</sup>                           |
| Магнитовакуумметры сильфонные               | МВС-П                              | $(-1 \div 0 \div +5) \div (-1 \div 0 \div +24)$ кгс/см <sup>2</sup>                                 |
| Манометры абсолютного давления, сильфонные  | МАС-П                              | $(0-0,25) \div (0-25)$ кгс/см <sup>2</sup>                                                          |
| Дифманометры мембранные                     | ДМ-П                               | $(0-10) \div (0 \div 4000)$ кгс/м <sup>2</sup><br>$0-0,4; 0-0,63; 0-1,0; 0-1,6$ кгс/см <sup>2</sup> |
| Дифманометры сильфонные                     | ДМ-С                               | $(0-400) \div (0-2500)$ кгс/м <sup>2</sup><br>$(0-0,4) \div (0-6,3)$ кгс/см <sup>2</sup>            |
| Термометры манометрические                  | ТДЖ-П, ТДГ-П                       | $0-25; 0-50; 0-100; 0-150; 0-200$<br>$0-300; -50 \div +50; -50 \div +150^\circ\text{C}$             |

подвижного сопла 7. Возникший в линии сопла сигнал управляет давлением, поступающим с пневмоусилителя 8 в сильфон отрицательной обратной связи 9. Это давление компенсирует усилие от измерительного блока и является одновременно выходным сигналом преобразователя. Настройка на заданный диапазон измерения производится плавным изменением передаточного отношения рычажной системы 5 путем перемещения наездника 10 вдоль этой системы. Точная установка производится при помощи пружины 11 корректора нуля.

Пневмоусилитель 8 в схеме преобразователя предназначен для увеличения расхода воздуха (усилитель мощности), что позволяет уменьшить влияние паразитных емкостей и запаздывания сигналов в длинных трубопроводах. Схема и принцип работы мембранного пневмоусилителя достаточно подробно изложены в литературе.

Класс точности манометрических термометров 1; 1,5. Длина дистанционного капилляра 2,5 м.

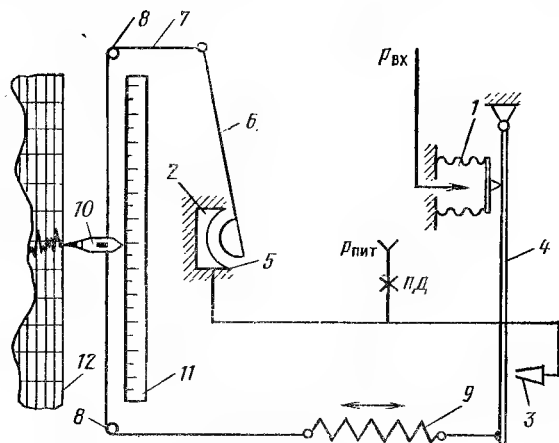


Рис. 5.11. Схема вторичного прибора.

Для показания и записи унифицированных пневматических сигналов изготавливается ряд измерительных приборов (ПВ1.3, ПВ2.2, ПВ2.3, ПВ3.2, ПВ10.1, ПВ10.2 и др.). Приборы базируются на унифицированном измерительном узле, рассчитанном для показания и записи одного параметра (рис. 5.11).

В случае необходимости осуществлять показания и запись двух или трех параметров прибор комплектуется из соответствующего количества аналогичных измерительных узлов. Действие измерительного узла основано на компенсационном принципе, при котором усилие на приемном элементе, возникающее от входного давления,

уравновешивается усилием от давления воздуха источника питания.

Сигнал  $p_{вх}=0,02-0,1$  МПа с выхода измерительного преобразователя поступает в приемный сильфон 1 (воздух через дроссель ПД подается в силовой элемент 2 и к соплу 3). При изменении  $p_{вх}$  сильфон 1, дно которого упирается в рычаг 4, перемещает его, вызывая изменение зазора между соплом 3 и заслонкой-рычагом 4. Давление при закрытии заслонки в силовом элементе 2 и в линии сопла увеличивается. Под давлением чашечная мембрана 5 силового элемента 2 выгибается, отводя рычаг 6, к верхнему концу которого прикреплен лавсановый шнур 7. Шнур огибает ролики 8 и прикрепляется к пружине обратной связи 9, соединенной с нижним концом рычага 4. На шнуре закреплены перо и стрелка 10, которые перемещаются вдоль шкалы 11 и диаграммной ленты 12, осуществляя показание и запись параметра.

### 5.3. Функциональный состав и принцип действия элементов УСЭПА

Основу современной ветви пневматических средств регулирования ГСП составляют устройства универсальной системы элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭПА). На основе УСЭПА конструируются регулирующие и функциональные блоки, а также ряд устройств и систем централизованного контроля и управления.

Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭПА) представляет собой набор отдельных элементов, каждый из которых может выполнять лишь простейшую функцию преобразования сигнала в общей схеме всего устройства. Так, в составе УСЭПА имеются пневматические емкости, сопротивления, дроссельные сумматоры, усилители, реле и др.

**Пневмоемкость** — элемент, в котором накопление потенциала осуществляется за счет изменения давления при постоянном объеме. В зависимости от функционального назначения различают постоянные и переменные пневмоемкости.

Постоянная пневмоемкость (рис. 5.12,а) представляет собой цилиндрическую жесткую камеру 1 с двумя штуцерами 2. Переменная пневмоемкость (рис. 5.12,б) представляет собой рабочий объем 3, величину которого можно настраивать путем изменения степени деформации сильфона с помощью винта 4. Условные обозначения постоянных и переменных пневмоемкостей на схемах показаны на рис. 5.12,в, г.

**Пневмосопротивление (дроссель)** — предназначено для создания сопротивления течению воздуха (дросселирование потока газа). В зависимости от функционального назначения пневматические сопротивления разделяют на постоянные, переменные и управляемые. Постоянные (нерегулируемые) сопротивления представ-

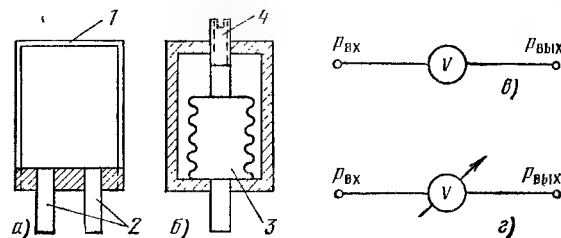


Рис. 5.12. Пневмостат.

а — постоянный объем; б — переменный объем; в, г — условные изображения.

ляют собой капилляр длиной 20 мм с отверстием диаметром 0,32 или 0,18 мм (рис. 5.13,а).

Переменные (регулируемые) пневмосопротивления — сопротивления, величина которых может изменяться в определенных пределах. В качестве регулируемых сопротивлений чаще всего используется конструкция, содержащая рабочую пару «конус — конус» (рис. 5.13,б).

Управляемые пневмосопротивления — сопротивления, величина которых может изменяться под действием какого-либо параметра (т. е. величина этих сопротивле-

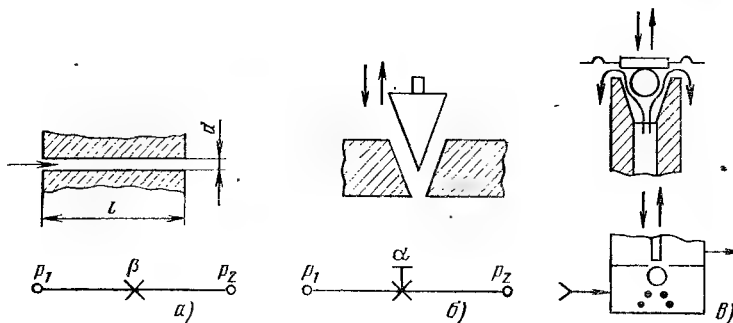


Рис. 5.13. Пневмосопротивления.

а — нерегулируемый дроссель; б — регулируемый дроссель; в — управляемое пневмосопротивление.

ний может изменяться в процессе работы пневматического устройства автоматически). Наиболее распространенные управляемые сопротивления — сопротивления типа «сопло-заслонка», «сопло-шарик» и др. (рис. 5.13,в).

**Дроссельные сумматоры** (иногда их называют дроссельными делителями) реализует операцию сложения двух пневматических сигналов (давлений), поступающих через постоянный (ДП) и регулируемый (ДР) дроссели (рис. 5.14,а). В составе УСЭППА имеются



Рис. 5.14. Дроссельный сумматор.

а — условное изображение; б — дроссельный сумматор с глухой камерой.

два типа дроссельных сумматоров, отличающихся друг от друга тем, что в одном из них регулируемый дроссель снабжен шкалой.

В стационарном режиме в междроссельном объеме, который можно рассматривать как прогонную камеру, устанавливается давление  $p_{\text{вых}}$ , при котором массовый расход через дроссель ДР должен быть равен массовому расходу через дроссель ДП. Если принять, что перепады давлений  $p_1 - p_{\text{вых}}$  на дросселе с проводимостью  $\alpha$  и  $p_{\text{вых}} - p_2$  на дросселе с проводимостью  $\beta$  малы, а режимы протекания воздуха через дроссели ламинарны, то на основании равенства массовых расходов можно записать:

$$\alpha(p_1 - p_{\text{вых}}) = \beta(p_{\text{вых}} - p_2). \quad (5.3)$$

После преобразований получим:

$$p_{\text{вых}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} p_1 + \frac{\beta}{\alpha + \beta} p_2. \quad (5.4)$$

Обозначая  $\frac{\alpha}{\alpha + \beta} = k_1$ ,  $\frac{\beta}{\alpha + \beta} = k_2$ , можно заметить, что

$$k_1 + k_2 = 1.$$

Поскольку выход дроссельных сумматоров чаще всего подается в глухие камеры конечного объема, то при анализе динамических характеристик устройств пневмоавтоматики нельзя пренебрегать переходными режимами. Выведем уравнение, описывающее динамику системы, представленной на рис. 5.14,б. Зависимость массы сжа-

того воздуха  $J$  в глухой камере на выходе сумматора объемом  $V$  от выходного давления  $p_{\text{вых}}$  и температуры  $\theta$  при газовой постоянной  $R$  выражается уравнением состояния газа

$$p_{\text{вых}} V = JR\theta. \quad (5.5)$$

Изменение массы воздуха в единицу времени в глухой камере может происходить только через постоянный дроссель  $ДП$  с проводимостью  $\beta$  и переменный дроссель  $ДР$  с проводимостью  $\alpha$ . Принимая расходы через сопротивления линейными функциями перепада давлений, получим:

$$\frac{dJ}{dt} = \alpha(p_1 - p_{\text{вых}}) + \beta(p_2 - p_{\text{вых}}); \quad (5.6)$$

из (5.5) имеем:

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{V}{R\theta} \frac{dp_{\text{вых}}}{dt}. \quad (5.7)$$

Подставляя (5.7) в (5.6), после преобразований получим:

$$\frac{V}{R\theta(\alpha + \beta)} \frac{dp_{\text{вых}}}{dt} + p_{\text{вых}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} p_1 + \frac{\beta}{\alpha + \beta} p_2, \quad (5.8)$$

где  $\frac{V}{R\theta(\alpha + \beta)} = T$  — постоянная времени дроссельного сумматора, зависит от объема глухой камеры на выходе.

С учетом принятых обозначений выражение (5.8) примет вид:

$$T \frac{dp_{\text{вых}}}{dt} + p_{\text{вых}} = k_1 p_1 + k_2 p_2. \quad (5.8a)$$

Из уравнения (5.8a) видно, что дроссельный сумматор, работающий в комплекте с глухой камерой, представляет собой апериодическое звено первого порядка. Как будет показано ниже, дроссельные сумматоры являются неотъемлемой частью практически всех пневматических регуляторов.

**Пневматические усилители давления** (их также называют элементами сравнения) строятся с использованием двухсоплового механо-пневматического преобразователя. В состав УСЭИПА входят трехмембранные пневмоусилители с двумя входами и пятимембранные с четырьмя входами. Трехмембранный пневмоусилитель с двумя входами (рис. 5.15, а) состоит из двух пневмосопротивлений типа «сопло-заслонка» (1, 4, и 2, 5) и мембранного блока 3, образующего вместе с корпусом глухие камеры. Мембранный блок содержит три эластичные мембраны 6, 7, 8, соединенные общим штоком, торцы которого 4, 5 и служат заслонками сопел 1 и 2. Мембранный блок может перемещаться в вертикальном направлении. Движение его ограничивается упором торцов в сопла 1 или 2. Эффективные площади мем-

бран 6 и 8 равны друг другу и значительно меньше эффективной площади мембраны 7. Камеры А и Г, в которых располагаются сопла, соединяются последовательно (штуцера в и б объединены) и образуют тем самым проточную камеру с двумя управляемыми пневмосопротивлениями. К соплу 1 через штуцер г подводится давление питания  $p_{\text{пит}}$ , сопло 2 через штуцер а сообщается с атмосферой ( $p_{\text{атм}}$ ). Входные давления  $p_1$

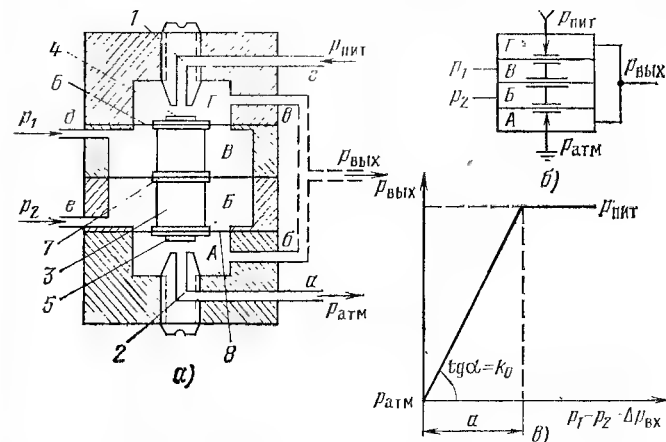


Рис. 5.15. Пневмоусилитель давления на два входа.

а — упрощенная схема; б — условное изображение; в — характеристика пневмоусилителя.

и  $p_2$  подводятся к глухим камерам В и Б через штуцера д и е. Из-за различия эффективных площадей мембран, образующих глухие камеры, при увеличении давления  $p_1$  в двухвходовом усилителе давление на выходе  $p_{\text{вых}}$  увеличивается, а при увеличении давления  $p_2$  — уменьшается. Поэтому камеру В будем называть положительной, а камеру Б — отрицательной.

Так как положение мембранного блока относительно управляемых сопротивлений определяет величину выходного давления, а в то же время само определяется значениями входных сигналов, то между давлением  $p_{\text{вых}}$  и значениями давлений  $p_1$  и  $p_2$  имеет место однозначная зависимость, обладающая значительной крутизной. Упрощенное условное изображение пневмоусилителя показано на рис. 5.15, б.

На рис. 5.15, в показана идеализированная статическая характеристика усилителя. Реальная характери-

ка отличается от идеализированной и имеет форму петли гистерезиса (это явление обусловлено тем, что эластичные мембраны обладают упругостью). Наличие гистерезиса вызывает некоторую нечувствительность усилителей, а их коэффициент усиления в диапазоне изменения разности давлений  $p_1 - p_2$  не более чем  $a = 0,4 \cdot 10^{-3}$  МПа колеблется в пределах 100—200. Таким образом, окончательно можно записать:

$$p_{\text{вых}} = k_0(p_1 - p_2). \quad (5.9)$$

Двухвходовый усилитель иногда используется в схемах управления как элемент сравнения и выполняет операцию:

$$p_{\text{вых}} = \text{sign}(p_1 - p_2) \begin{cases} p_{\text{вых}} = 0; & p_1 < p_2, \\ p_{\text{вых}} = 1; & p_1 > p_2. \end{cases} \quad (5.10)$$

При указанных характеристиках применять рассмотренные усилители практически невозможно, так как

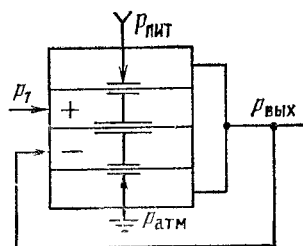


Рис. 5.16. Пневмоусилитель с отрицательной обратной связью.

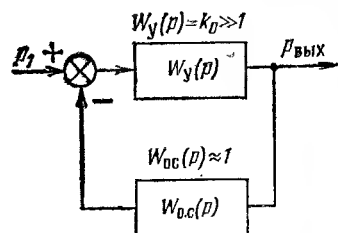


Рис. 5.17. Структурная схема пневмоусилителя с отрицательной обратной связью.

имеющие место изменения входных давлений и давлений питания нарушают устойчивость усилителя и он работает в релейном режиме.

Устойчивая работа пневмоусилителя наблюдается в случае охвата его отрицательной обратной связью (рис. 5.16). Чаще всего используется единичная отрицательная обратная связь. Тогда при условии  $k_0 \gg 1$  такое устройство выполняет операцию повторения входного сигнала. В соответствии с рис. 5.17 передаточная функция замкнутой системы как отношение  $p_{\text{вых}}$  к  $p_1$  запишется в виде

$$W_{\text{з.с.}}(p) = \frac{W_y(p)}{1 + W_y(p)W_{\text{о.с.}}(p)} = \frac{k_0}{1 + k_0} \Big|_{k_0 \gg 1} \approx 1, \quad (5.11)$$

т. е.  $p_{\text{вых}} = p_1$ .

При этом следует заметить, что чем больше коэффициент усиления  $k_0$ , тем точнее реализуется операция повторения.

Пятимембранные усилители с четырьмя входами (рис. 5.18, а) являются разновидностью рассмотренного. Для них несколько больше величина  $a$  и, следовательно, несколько меньше коэффициент усиления. Охваченные единичной отрицательной обратной связью (ООС) усилители имеют три свободных входа (два положительных

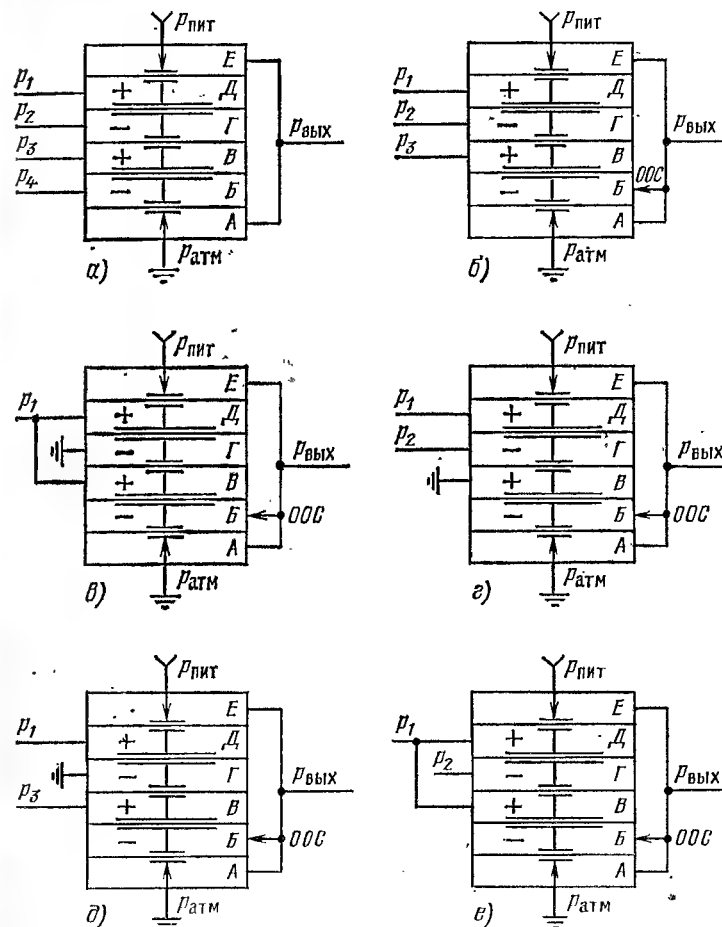


Рис. 5.18. Операции, реализуемые на пятимембранном усилителе. а — сравнения; б — алгебраического суммирования; в — умножения на 2; г — вычитания; д — сложения; е — умножения на 2 и вычитания.



и один отрицательный) и по аналогии с рассмотренным выше трехмембранным усилителем также реализуют операцию повторения  $p_{\text{вых}} = \Delta p_{\text{вх}}$ . В свою очередь  $\Delta p_{\text{вх}}$  можно рассматривать:

как алгебраическую сумму (рис. 5.18,б)

$$p_{\text{вых}} = p_1 - p_2 + p_3,$$

как умножение на два при  $p_2 = 0$  и  $p_1 = p_3$  (рис. 5.18,в):

$$p_{\text{вых}} = 2p_1,$$

как операцию вычитания при  $p_3 = 0$  (рис. 5.18,г):

$$p_{\text{вых}} = p_1 - p_2,$$

как операцию сложения при  $p_2 = 0$  (рис. 5.18,д):

$$p_{\text{вых}} = p_1 + p_3,$$

как операцию умножения на два и вычитания при  $p_1 = p_3, p_2 \neq 0$  (рис. 5.18,е):

$$p_{\text{вых}} = 2p_1 - p_2.$$

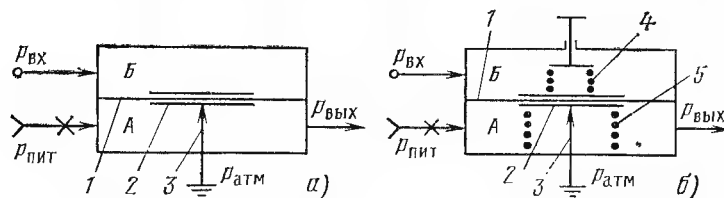


Рис. 5.19. Пневмоповторители.  
а — обычный; б — со сдвигом.

Рассмотренные усилители нашли широкое применение при реализации аналоговых пневматических регулирующих устройств, осуществляющих типовые П-, ПИ- и ПИД-законы регулирования.

**Повторитель пневматического сигнала** (рис. 5.19,а) состоит из входной камеры Б и выходной А, разделенных гибкой мембраной 1. Жесткий центр 2 этой мембраны служит заслонкой сопла 3.

Повторитель действует по принципу компенсации усилий. Входной пневматический сигнал поступает в камеру Б и развивает на мембране 1 усилие, направленное вниз. В камеру А через постоянный дроссель ПД, в комплекте с которым работает пневмоповторитель, непрерывно подается воздух из линии питания. Часть воздуха через зазор между заслонкой 2 и соплом 3 сбрасывается в атмосферу. В камере А устанавливается

давление, промежуточное по величине между давлениями  $p_{\text{пит}}$  и  $p_{\text{атм}}$ . Это давление, являющееся выходным давлением  $p_{\text{вых}}$ , развивает на мембране 1 усилие, направленное вверх. Оба давления  $p_{\text{вх}}$  и  $p_{\text{вых}}$  непрерывно сравниваются. Таким образом, выходной пневматический сигнал элемента всегда следит за изменением входного сигнала.

Статическая точность таких повторителей составляет 0,25—0,35% стандартного диапазона пневматических сигналов.

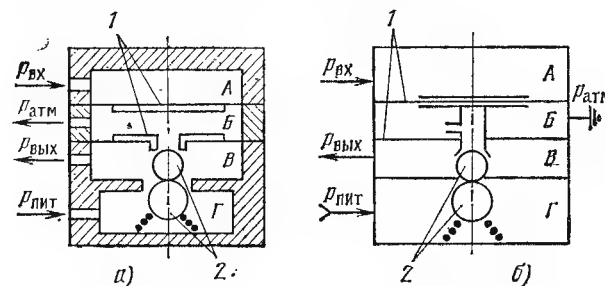


Рис. 5.20. Усилитель мощности (мощный повторитель).  
а — упрощенная схема; б — условное изображение.

Введением в схему рассмотренного повторителя двух пружин 4 и 5 (рис. 5.19,б), одна из которых регулируемая (4), можно получить повторитель со сдвигом.

**Усилители мощности** предназначены для повторения непрерывного входного пневматического сигнала и усиления его по мощности (расходу воздуха). Усилители применяются в качестве выходных элементов в большинстве приборов, построенных из элементов УСЭППА. Модификации усилителей мощности различаются принципиальной схемой и технологическими характеристиками.

Усилитель (рис. 5.20) состоит из трех шайб, разделенных гибкими мембранами и собранных так, что в элементе образуются четыре камеры. В камеру А подается входной сигнал. Камера Б соединена с атмосферой, в камере В формируется выходной сигнал элемента, а камера Г соединена с источником питания.

Принцип действия элемента — компенсационный: усилие, развиваемое на двоянной мембране 1 входным сигналом  $p_{\text{вх}}$ , непрерывно сравнивается и компенсируется усилием, развиваемым на той же мембране выходным сигналом  $p_{\text{вых}}$ . При нарушении равновесия сил на

мембранном блоке двойной шариковый клапан 2 откроет контакт, соединяющий выходную камеру В с атмосферой или с камерой питания, что приведет к восстановлению равновесия.

В связи с тем, что в таком усилителе мембранный блок собран из грубых (менее чувствительных) мембран и не разгружен от действия посторонних усилий, повторение сигнала осуществляется со значительной статической ошибкой (до 5% стандартного диапазона пневматических сигналов. В то же время большие проходные сечения шариковых клапанов обеспечивают усилителю высокие динамические свойства.

**Реле переключения** предназначено для поочередного соединения двух пневматических каналов с третьим. Реле можно использовать в различных системах контроля и регулирования, включая его по необходимости для каждого отдельного случая схеме.

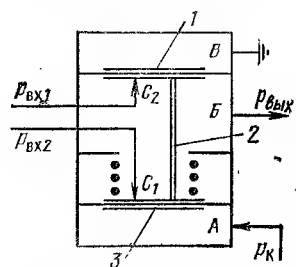


Рис. 5.21. Реле переключения.

Реле (рис. 5.21) состоит из трех камер, разделенных мембранами, жесткие центры которых являются заслонками сопел  $C_1$  и  $C_2$ . Мембраны 1 и 3 жестко соединены между собой штоком 2. Давление команды  $p_k$  подается в камеру А. Камера В сообщается с атмосферой. При  $p_k=0$  сопло  $C_1$  открыто в камеру В, а сопло  $C_2$  закрыто под действием пружины. При  $p_k \neq 0$  — наоборот.

Кроме рассмотренных УСЭППА содержит большое число элементов, предназначенных для выполнения различных функций контроля, индикации, регулирования и логического управления.

#### 5.4. Схемы реализации основных законов регулирования на элементах УСЭППА

Элементы УСЭППА имеют широкое применение при серийном изготовлении пневматических средств, реализующих все типовые законы регулирования. Эти средства известны под названием пневматических средств контроля и регулирования системы «Старт».

Все регуляторы системы «Старт» могут работать с любыми устройствами, имеющими входные и выходные

унифицированные пневматические сигналы. Специальный дискретный элемент (реле переключения) позволяет осуществлять плавный, без скачков давления, переход от ручного управления к автоматическому регулированию. Регуляторы включают в себя позиционные (Пз), пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ), пропорционально-интегральные соотношения (в том числе с коррекцией по третьему параметру) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы.

**Позиционные регуляторы** реализуют закон регулирования вида

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{вых}} &= 1 \text{ при } p_{\text{н.п}} \geq p_{\text{зд}} \\ p_{\text{вых}} &= 0 \text{ при } p_{\text{н.п}} \leq p_{\text{зд}} \end{aligned} \right\} \text{ при настройке на максимум;}$$

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{вых}} &= 1 \text{ при } p_{\text{н.п}} \leq p_{\text{зд}} \\ p_{\text{вых}} &= 0 \text{ при } p_{\text{н.п}} \geq p_{\text{зд}} \end{aligned} \right\} \text{ при настройке на минимум,}$$

где  $p_{\text{вых}}$  — значение выходного сигнала;  $p_{\text{н.п}}$  — значение сигнала регулируемой величины, поступающего с измерительного преобразователя;  $p_{\text{зд}}$  — заданное значение регулируемой величины.

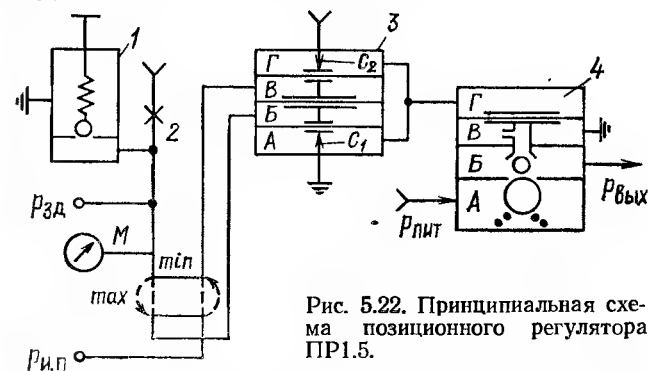


Рис. 5.22. Принципиальная схема позиционного регулятора ПР1.5.

При выходе регулируемого параметра за установленное значение регулятор выдает дискретные пневматические сигналы 1 и 0, которые могут быть использованы как для двухпозиционного регулирования, так и для сигнализации.

Принципиальная схема одного из позиционных регуляторов (ПР 1.5) приведена на рис. 5.22. Регулятор настраивается на максимум или минимум посредством переключения входных каналов. При настройке на минимум  $p_{\text{н.п}}$  поступает в камеру В элемента 3,

$p_{зд}$  от задатчика 1 подводится в камеру В. Пока  $p_{н.п} > p_{зд}$ , сопло  $C_2$  закрыто и сигнал на выходе принимает нижнее значение. При  $p_{н.п} < p_{зд}$  сопло  $C_2$  открывается и выходной сигнал принимает верхнее значение. Аналогично регулятор работает и в положении «максимум».

Выходное давление с элемента 3 усиливается усилителем мощности 4. Настройка задания осуществляется по манометру М.

Имеются также регуляторы с настраиваемой зоной возврата (ПР1.6), реализующие закон регулирования вида

$$p_{вых} = 1 \text{ при } p_{н.п} \geq p_{зд} + \frac{1}{2} \Delta;$$

$$p_{вых} = 0 \text{ при } p_{н.п} \leq p_{зд} - \frac{1}{2} \Delta;$$

$p_{вых}$  равен своему предыдущему значению при

$$p_{зд} - \frac{1}{2} \Delta < p_{н.п} < p_{зд} + \frac{1}{2} \Delta,$$

где  $\Delta$  — значение зоны возврата регулятора, устанавливаемой с помощью встроенного задатчика.

**Пропорциональные регуляторы (ПР2.5 и ПР2.8).** На элементах УСЭППА можно реализовать несколько видов пропорциональных регуляторов, обладающих различными структурными схемами, а следовательно, и различными качественными показателями. Наибольшее распространение получили пропорциональные регуляторы типа ПР2.5 и ПР2.8.

Принципиальная схема регулятора ПР2.5 представлена на рис. 5.23.

На вход усилителя 1 поступают:  $p_{н.п}$  — давление, пропорциональное регулируемой величине (от соответствующего измерительного преобразователя);  $p_{зд}$  — давление от задатчика, установленное обычно во вторичных приборах со встроенной станцией управления (типа ПВ10.1Э, ПВ10.1П, ПВ10.2Э, ПВ10.2П) и  $p_0$  — давление от ручного задатчика — корректора, установленного в регулирующем блоке и определяющего начальное значение выходного сигнала при  $p_{н.п} = p_{зд}$ . Давление  $p_0$  получило название давления контрольной точки. Заранее установленное давление контрольной точки  $p_0$  даст возможность получать увеличение или уменьшение выходного давления  $p_{вых}$  при отклонении  $p_{н.п}$  от  $p_{зд}$ .

В усилителе 1, охваченном отрицательной обратной связью, получается пневматический сигнал рассогласования  $p_1 = p_{зд} - p_{н.п} + p_0$ , который затем поступает в дроссельный сумматор 2, где, суммируясь с выходным сигналом регулирующего устройства с  $p_{вых}$ , корректируется в соответствии с П-законом регулирования.

Для дроссельного сумматора в состоянии равновесия можно записать:

$$p_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} p_1 + \frac{\beta}{\alpha + \beta} p_{вых}, \quad (5.12)$$

где  $\alpha$  — проводимость регулируемого дросселя;  $\beta$  — проводимость нерегулируемого дросселя сумматора 2.

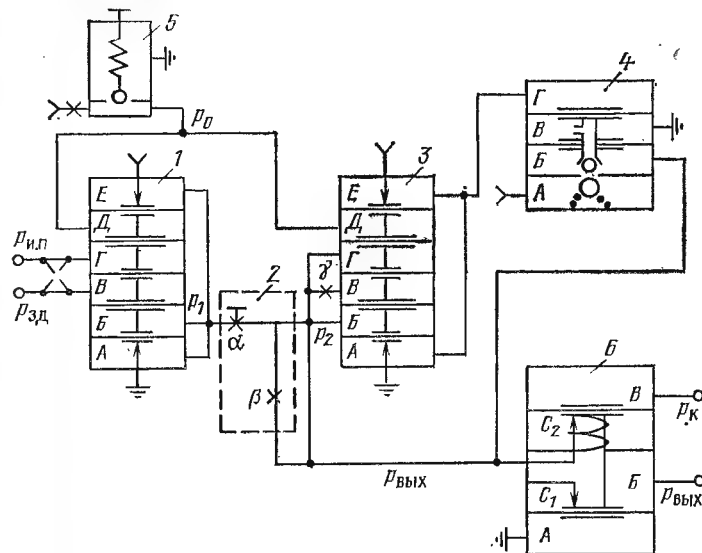


Рис. 5.23. Принципиальная схема регулятора ПР2.5.

Кроме сигнала  $p_2$  на вход элемента 3 поступает давление контрольной точки  $p_0$  от ручного задатчика 5. Равновесие элемента 3 определяется условием  $p_2 = p_0$ . После преобразований с учетом выражения для  $p_1$  получим:

$$p_{вых} = p_0 + \frac{\alpha}{\beta} (p_{н.п} - p_{зд}). \quad (5.13)$$

Обозначив  $\alpha/\beta = K_p$ ,  $p_{н.п} - p_{зд} = p_{вх}$ , получим уравнение регулятора в виде

$$p_{вых} = p_0 + K_p p_{вх}. \quad (5.14)$$

Уравнение совпадает с типовым законом П-регулятора. Для нормальной работы регулятора необходим правильный выбор направления изменения давления в линии исполнительного механизма при увеличении или

уменьшении регулируемого параметра. Направление может меняться с помощью специального переключателя, выполненного в виде диска с надписями: «ОБР» (обратный) и «ПРЯМ» (прямой), относительно риски, сделанной на плате (на рис. 5.23 показано пунктиром).

Структурная схема регулятора ПР2.5 представлена на рис. 5.24. Пренебрегая объемами глухих камер элементов, все звенья рассматриваем как пропорциональные. При этом следует отметить,

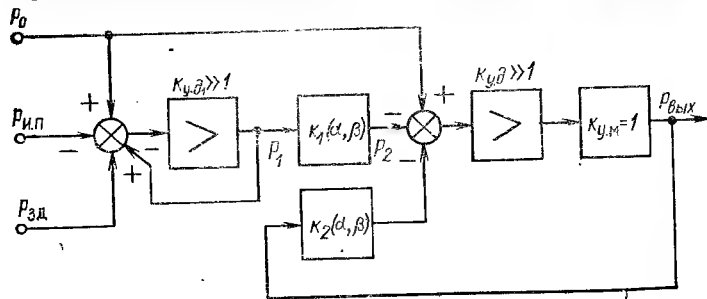


Рис. 5.24. Структурная схема регулятора ПР2.5.

что обратная связь, поступающая в камеру  $\Gamma$  (см. рис. 5.23) и в камеру  $B$  через постоянный дроссель  $\gamma$  (усилитель 3), используется для гашения автоколебаний и является исчезающей. В динамическом отношении обратная связь представляет собой дифференцирующее звено и при выводе передаточной функции регулятора может не учитываться из-за пренебрежения объемами камер  $B$  и  $\Gamma$ .

Усилитель мощности усиливает сигнал по мощности (расходу), оставляя давление без изменений, т. е.  $k_{y.m}=1$ . С учетом отмеченного можно записать:

$$p_{\text{вых}} = \frac{k_{y.д2} k_{y.m}}{1 + k_{y.д2} k_{y.m} k_2} (p_0 - p_2) \Big|_{\substack{k_{y.д2} \gg 1 \\ k_{y.m} \approx 1}} = \frac{1}{k_2} (p_0 - p_2), \quad (5.15)$$

где

$$p_2 = k_1 p_1, \quad (5.16)$$

$$p_1 = \frac{k_{y.д1}}{1 + k_{y.д1}} (p_0 - p_{н.п} + p_{з.д}) \Big|_{k_{y.д1} \gg 1} = p_0 - p_{н.п} + p_{з.д}. \quad (5.17)$$

Подставляя в (5.15) выражения (5.16) и (5.17), с учетом того,

что  $k_1 + k_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} + \frac{\beta}{\alpha + \beta} = 1$ , получим:

$$p_{\text{вых}} = \frac{1}{k_2} [p_0 - k_1 (p_0 - p_{н.п} + p_{з.д})] = p_0 + \frac{k_1}{k_2} (p_{н.п} - p_{з.д}), \quad (5.18)$$

где  $k_1/k_2 = K_p$  — коэффициент усиления, обратно пропорциональный коэффициенту неравномерности  $\delta$  для пневматических регуляторов известно под названием диапазона дросселирования, т. е.

$$K_p = \frac{1}{\delta} 100\%. \quad (5.19)$$

Диапазон дросселирования  $\delta$  настраивается изменением проводимости  $\alpha$  регулируемого дросселя. При закрытии дросселя коэффициент усиления имеет минимальное значение, т. е.  $K_p \rightarrow 0$ , а  $\delta \rightarrow \infty$ . Если дроссель полностью открыт, то  $K_p \rightarrow \infty$ , а  $\delta \rightarrow 0$ .

На практике в серийных регуляторах ПР2.5 значение  $\delta$  выбирают из ряда: 5—100, 10—300, 40—500, 100—1000, 150—1500, 500—3000%.

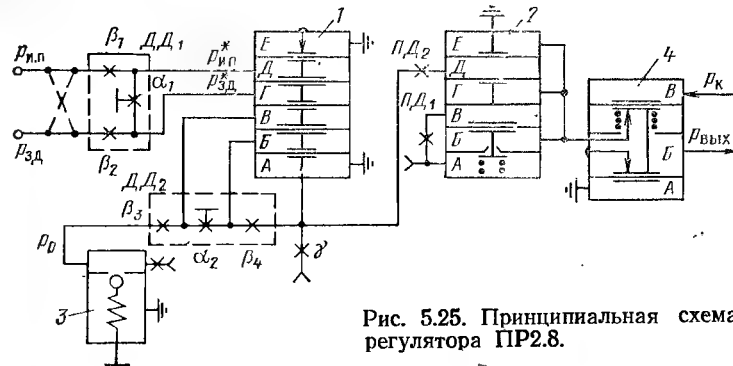


Рис. 5.25. Принципиальная схема регулятора ПР2.8.

Рассмотрим работу регулирующего устройства ПР2.5 (см. рис. 5.23). Предположим, что  $p_{н.п} > p_{з.д}$ . В этом случае выходное давление  $p_1$  сумматора 1 падает и поступает на регулируемый дроссель  $\alpha$  дроссельного сумматора 2. Выходной сигнал с регулирующего устройства  $p_{\text{вых}}$  поступает на нерегулируемый дроссель с проводимостью  $\beta$ . С дроссельного сумматора сигнал  $p_2$  поступает в камеру  $B$  усилителя давления 3, охваченного отрицательной обратной связью. Выходной сигнал усилителя складывается из давлений  $p_2$  и  $p_0$ , подается далее на усилитель мощности 4 и через отключающее реле 6 — на выход регулирующего устройства и на исполнительный механизм.

Новое состояние равновесия наступает при новом значении  $p_{\text{вых}}$ . Из соотношения  $p_0 = k_1 p_1 + k_2 p_{\text{вых}}$  видно, что с изменением  $p_{\text{вых}}$  должно измениться давление  $p_1$ , поскольку  $p_0$  остается постоянным, а из условия равновесия сумматора, реализованного на усилителе давления 1, следует, что  $p_{н.п}$  также должно измениться. Таким образом, каждому значению  $p_{\text{вых}}$  соответствует в замкнутой автоматической системе регулирования с пропорциональным регулятором ПР2.5 свое значение регулируемого параметра  $p_{н.п}$ .

Отключающее реле 6 при подаче контрольного сигнала  $p_k$  позволяет отключать регулятор от исполнительного механизма. При этом сопло  $C_2$  закрывается, а через сопло  $C_1$  можно дистанционно управлять исполнительным механизмом. Для безударного включения регулятора необходимо в камере  $B$  создать давление  $p_{\text{вых}}$ , после чего снять сигнал  $p_k$ .

На рис. 5.25 приведена схема пропорционального регулятора ПР2.8, отличающегося от рассмотренного расширенным диапазоном линейности статических характеристик. Регулятор построен по двухкаскадной схеме.

Первый каскад, осуществляющий формирование закона регулирования, выполнен на разностном усилителе 1 с постоянным дросселем  $\gamma$  в линии питания. В прямой канал и в цепь обратной связи включены делители давлений  $ДД_1$  ( $\alpha_1, \beta_1, \beta_2$ ) и  $ДД_2$  ( $\alpha_2, \beta_3, \beta_4$ ).

Второй каскад предназначен для усиления по мощности выходного сигнала регулятора и выполнен на точном мощном повторителе 2. С помощью задатчика 3 устанавливается контрольная точка  $p_0$  (давление на выходе при нулевом входном сигнале).

Выходной сигнал через переключающее реле идет на исполнительный механизм. Прежде чем перейти к структурной схеме регулятора, рассмотрим работу делителей давлений  $ДД_1$  и  $ДД_2$ . Входными сигналами  $ДД_1$  являются  $p_{н.п.}$ , подключенный через дроссель  $\beta_1$ , и  $p_{зл.}$ , подключенный через дроссель  $\beta_2$ . Выходным сигналом  $ДД_1$  является перепад давлений на переменном дросселе  $\alpha_1$ .

Принимая характеристики дросселей линейными, а проводимости  $\beta_1$  и  $\beta_2$  равными  $\beta_1 = \beta_2 = \beta'$ , запишем выражение для расхода воздуха через  $\alpha_1, \beta_1, \beta_2$ :

$$G_{\beta_1} = \beta' (p_{н.п.} - p_{н.п.}^*); G_{\beta_2} = \beta' (p_{зл.}^* - p_{зл.});$$

$$G_{\alpha_1} = \alpha_1 (p_{н.п.}^* - p_{зл.}^*). \quad (5.20)$$

Выход дроссельного сумматора нагружен глухими камерами, поэтому  $G_{\beta_1} = G_{\beta_2} = G_{\alpha_1}$  и после преобразования получим:

$$p_{вых, ДД_1} = p_{н.п.}^* - p_{зл.}^* = \frac{\beta'}{\beta' + 2\alpha_1} (p_{н.п.} - p_{зл.}) = k_1 (p_{н.п.} - p_{зл.}), \quad (5.21)$$

где  $k_1 = \frac{\beta'}{\beta' + 2\alpha_1}$  — коэффициент сумматора  $ДД_1$ .

При  $\alpha_1 = 0$ , что соответствует закрытому сопротивлению,  $k_1 = 1$ . Когда сопротивление полностью открыто  $\alpha_1 \gg \beta'$ , то  $k_1 \rightarrow 0$ .

По аналогии для  $ДД_2$  с учетом, что  $\beta_3 = \beta_4 = \beta''$

$$p_{вых, ДД_2} = \frac{\beta''}{\beta'' + 2\alpha_2} (p_0 - p_{вых}) = k_2 (p_0 - p_{вых}), \quad (5.22)$$

где  $k_2 = \frac{\beta''}{\beta'' + 2\alpha_2}$  — коэффициент сумматора  $ДД_2$ .

С учетом полученных выражений структурная схема ПР2.8 может быть приведена к виду, представленному на рис. 5.26. Согласно схеме передаточная функция ПР2.8 по каналу  $p_{н.п.} \rightarrow p_{зл.} \rightarrow p_{вых}$  имеет вид:

$$W(p) = k_1 / k_2 = K_p, \quad (5.23)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  могут изменяться от 1 при полностью закрытом переменном дросселе до 0 при полностью открытом (при условии, что  $\alpha \gg \beta$ ).

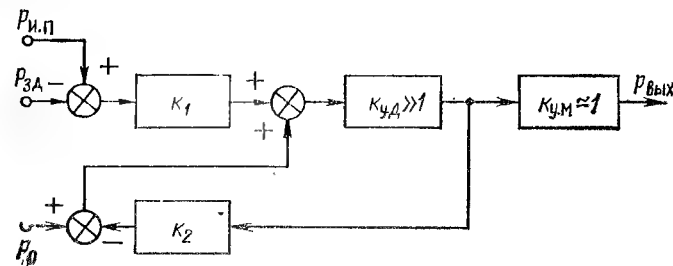


Рис. 5.26. Структурная схема регулятора ПР2.8.

С учетом изложенного в регуляторе ПР2.8 используется следующая методика настройки требуемого значения коэффициента усиления: при  $K_p \leq 1$  ( $\delta \geq 100\%$ ) дроссель делителя обратной связи  $\alpha_2$  полностью перекрыт и настройку осуществляют переменным дросселем  $\alpha_1$  в прямом канале. При  $K_p \geq 1$  ( $\delta \leq 100\%$ ) коэффициент усиления устанавливают с помощью дросселя  $\alpha_2$  при полностью закрытом  $\alpha_1$ . Для подавления автоколебаний на входе усилителя мощности установлен демпфирующий дроссель  $ПД_2$ .

**Пропорционально-интегральные регуляторы (ПР3.21 и ПР3.31).** Пропорционально-интегральный регулятор ПР3.21 отличается от рассмотренного пропорционального регулятора ПР2.5 наличием интегрирующего звена, реализованного путем охвата аperiodического звена положительной единичной обратной связью. Принципиальная схема регулятора ПР3.21 приведена на рис. 5.27.

Регулятор состоит из пропорциональной части (элементы 1, 2, 6, 7), интегральной части (элементы 3, 4, 5) и переключающих реле 8 и 9. Связь между пропорциональной и интегральной частями регулятора осуществляется путем подачи давления с выхода интегральной части в камеры Д усилителей давления 1 и 2 пропорциональной части. Гашение возможных автоколебаний осуществляется так же, как и в пропорциональном регуляторе ПР2.5.

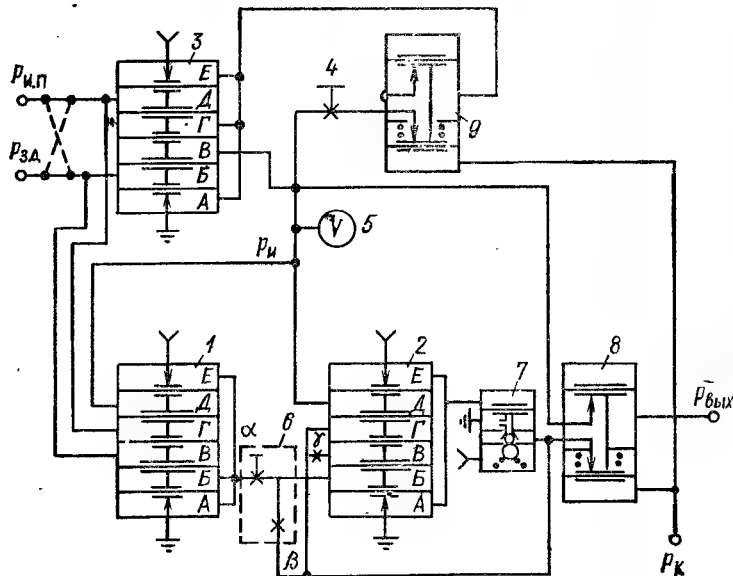


Рис. 5.27. Принципиальная схема регулятора ПР3.21.

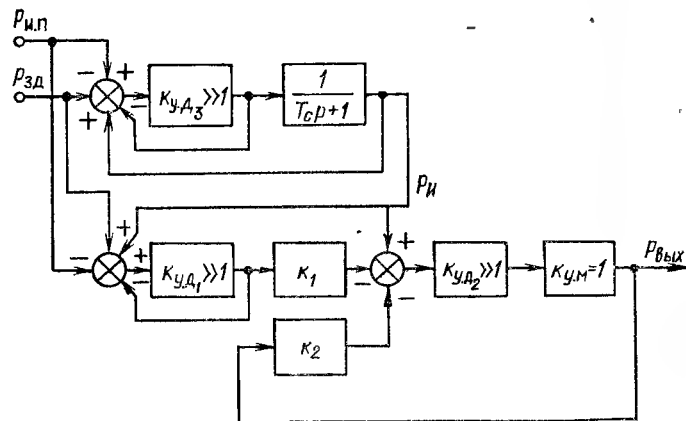


Рис. 5.28. Структурная схема регулятора ПР3.21.

При выводе передаточной функции регулятора емкостями камер элементов пренебрегаем, в связи с чем эти связи в структурной схеме (рис. 5.28) отсутствуют. Согласно структурной схеме

$$P_{\text{вых}} = \frac{k_{y.дз} k_{y.м}}{1 + k_{y.дз} k_{y.м} k_2} [p_n - k_1 (p_n - p_{н.п} + p_{зд})] = \frac{1 - k_1}{k_2} p_n + \frac{k_1}{k_2} (p_{н.п} - p_{зд}). \quad (5.24)$$

С учетом того, что  $k_1 + k_2 = 1$ , получим:

$$P_{\text{вых}} = p_n + K_p (p_{н.п} - p_{зд}). \quad (5.25)$$

Для интегральной части:

$$p_n = \frac{1}{T_c p + 1} (p_{н.п} - p_{зд}) = \frac{1}{T_c p} (p_{н.п} - p_{зд}), \quad (5.26)$$

где  $T_c$  — постоянная интегральной части.

Окончательно выражение для выходного регулирующего воздействия запишется в виде

$$P_{\text{вых}} = \left( \frac{1}{T_c p} + K_p \right) (p_{н.п} - p_{зд}), \quad (5.27)$$

откуда передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p) = \frac{P_{\text{вых}}}{p_{н.п} - p_{зд}} = K_p + \frac{1}{T_c p} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{ин}} p} \right). \quad (5.28)$$

Настройки пневматических регуляторов ПР3.21 могут быть определены по известным методикам для ПИ-регуляторов. Значения их должны быть приведены к величинам  $\delta$  и  $T_c$ , связанным с  $K_p$  и  $T_{\text{ин}}$  соотношениями:

$$\delta = \frac{1}{K_p} 100\%; \quad T_c = T_{\text{ин}} / K_p. \quad (5.29)$$

Регулятор ПР3.21 имеет практически независимые параметры настройки. Время интегрирования  $T_c$  может изменяться от 3 с до 100 мин, предел пропорциональности  $\delta$  от 5 до 3000%.

По аналогии с пропорциональным регулятором ПР2.8 разработан пропорционально-интегральный регулятор ПР3.31 с расширенным диапазоном линейности статических характеристик. Принципиальная схема регулятора ПР3.31 приведена на рис. 5.29.

Первый каскад для формирования интегральной составляющей реализован по схеме охвата аperiodического звена «дрессель — емкость» 7, 8 единичной положительной обратной связью.

Второй каскад для формирования пропорциональной составляющей выполнен на базе разностного усилителя давления 2, в прямом канале и в цепи обратной связи которого установлены дроссельные делители  $ДД_1$  и  $ДД_2$ .

Сигнал  $p_{н.п.}$ , пропорциональный регулируемому параметру, подводится к камере  $D$  элемента сравнения 1, а сигнал от задатчика  $p_{зд}$  к камере  $B$ . С выхода элемента 1 давление  $p_1$  поступает на

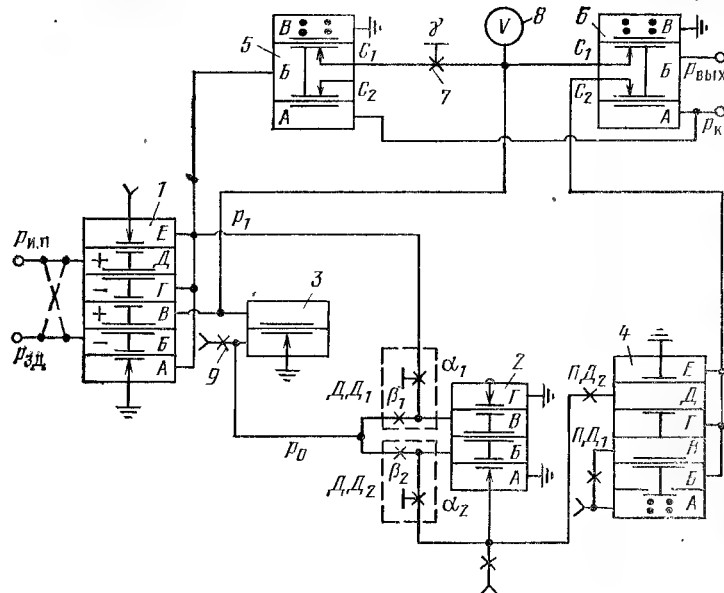


Рис. 5.29. Принципиальная схема регулятора ПР3.31.

входы пропорционального и интегрального каскадов. Интегральный

каскад вырабатывает сигнал  $p_{и.п.} = \frac{1}{T_c} \int (p_{н.п.} - p_{зд.}) dt$ , который воз-

вращается на элемент сравнения 1 в камеру  $B$  как положительная обратная связь. Таким образом, на элементе 1 формируется алгебраическая сумма трех давлений:

$$p_1 = p_{н.п.} - p_{зд.} + p_{и.п.} \quad (5.30)$$

Сигналы  $p_1$  и  $p_{и.п.}$  через дроссельные сумматоры  $ДД_1$  и  $ДД_2$  поступают на вход разностного усилителя 2, охваченного отрицательной обратной связью, через один из входов дроссельного сумматора  $ДД_2$ . Полагая, что разностный усилитель обладает большим коэффициентом усиления, в линейном приближении условие равновесия этого элемента запишется в виде

$$k_1 p_1 + (1 - k_1) p_{и.п.} = k_2 p_{вых.} + (1 - k_2) p_{и.п.}$$

откуда с учетом значений  $p_1$  и  $p_{и.п.}$

$$p_{вых.} = \frac{k_1}{k_2} (p_{и.п.} - p_{зд.}) + \frac{1}{T_c} \int_0^t (p_{и.п.} - p_{зд.}) dt, \quad (5.31)$$

где

$$k_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}; \quad k_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}.$$

Структурная схема регулятора ПР3.31 представлена на рис. 5.30. Выражение для значения выходного сигнала

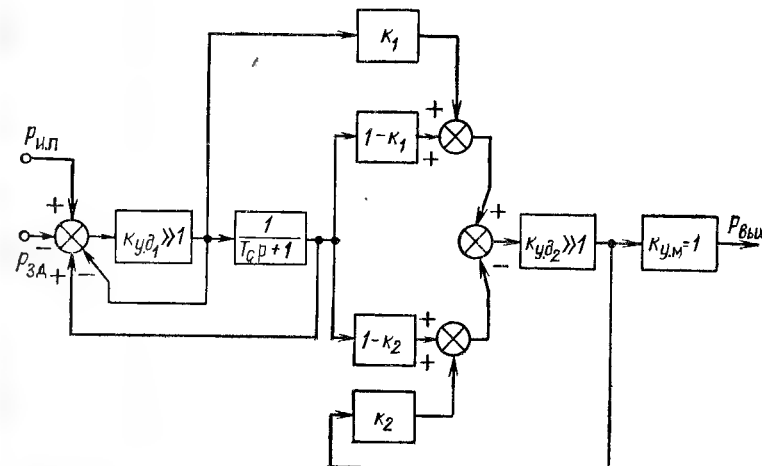


Рис. 5.30. Структурная схема регулятора ПР3.31.

ла может быть получено следующим образом:

$$\begin{aligned} p_{вых.} &= \frac{k_{у.д.} k_{у.м.}}{1 + k_{у.д.} k_{у.м.} k_2} \left[ k_1 \frac{T_c p + 1}{T_c p} (p_{н.п.} - p_{зд.}) + \right. \\ &+ \frac{1 + k_1}{T_c p} (p_{н.п.} - p_{зд.}) - \frac{1 - k_2}{T_c p} (p_{н.п.} - p_{зд.}) \left. \right] \frac{k_{у.д.} \gg 1}{k_{у.м.} \gg 1} = \\ &= \frac{1}{k_2} \left( k_1 + \frac{k_2}{T_c p} \right) (p_{н.п.} - p_{зд.}) = \\ &= \left( \frac{k_1}{k_2} + \frac{1}{T_c p} \right) (p_{н.п.} - p_{зд.}). \end{aligned}$$

Отсюда передаточная функция

$$W(p) = \frac{p_{вых.}}{p_{н.п.} - p_{зд.}} = K_p + \frac{1}{T_c p}, \quad \text{где } K_p = k_1/k_2. \quad (5.32)$$

Параметрами настройки регулятора ПРЗ.31 являются предел пропорциональности  $\delta = \frac{1}{K_p} 100\% = \frac{k_2}{k_1} 100\%$  и по-

стоянная интегрирования  $T_c$ . Изменение проводимости переменного дросселя  $\gamma$  обеспечивает настройку постоянной интегрирования от 0,05 до 100 мин.

Настройку коэффициента усиления осуществляют либо делителем  $ДД_1$  при  $3000\% \geq \delta \geq 100\%$ , либо делителем  $ДД_2$  при  $100\% \geq \delta \geq 2\%$ .

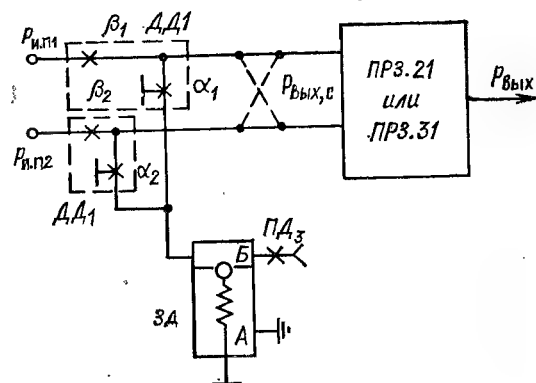


Рис. 5.31. Принципиальная схема регулятора соотношения.

Кроме рассмотренных ПИ-регуляторов следует отметить регулирующее устройство ПРЗ.29, реализующее ПИ-закон регулирования по аналогии с электрическими регуляторами в виде

$$p_{вых} = K_p \left[ (p_{и.п} - p_{зд}) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (p_{и.п} - p_{зд}) dt \right]. \quad (5.33)$$

Регулятор имеет переключатель с тремя фиксированными положениями, определяющими необходимые диапазоны предела пропорциональности: от 3 до 50, от 50 до 200 и от 200 до 800%. Диапазон настройки  $T_i$  находится в пределах от 15 с до 100 мин.

**Регуляторы соотношения (ПРЗ.23 и ПРЗ.33).** Регуляторы представляют собой последовательное соединение блока соотношения и соответствующего ПИ-регулятора типа ПРЗ.21 или ПРЗ.31.

Блок соотношения реализован на базе двух дроссельных сумматоров  $ДД_1$  и  $ДД_2$  и задатчика  $ЗД$  с сопротивлением  $ПД_3$  (рис. 5.31). Сигналы  $p_{и.п1}$  и  $p_{и.п2}$ , соотношение которых требуется поддерживать, поступают в регулятор через нерегулируемые сопротивления  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Соотношение устанавливается с помощью регулируемых сопротивлений  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  таким образом, чтобы при разных давлениях  $p_{и.п1}$  и  $p_{и.п2}$  давления, поступающие в схему регулятора ПРЗ.21 или ПРЗ.31, были равны.

Задатчик  $ЗД$  устанавливает начальный уровень давления 0,02 МПа (0,2 кгс/см²). Изменение одного из параметров вызывает нарушение равновесия и изменение выходного давления регулятора.

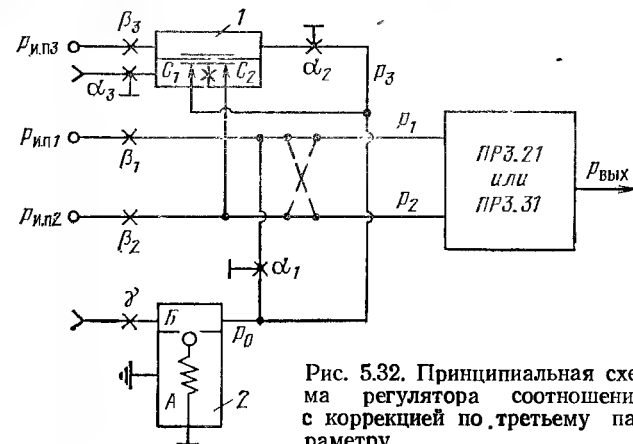


Рис. 5.32. Принципиальная схема регулятора соотношения с коррекцией по третьему параметру.

ра. Таким образом, на выходе блока соотношения получим:

$$p_{вых,с} = k_1 (p_{и.п1} - p_0) - k_2 (p_{и.п2} - p_0), \quad (5.34)$$

где  $p_0$  — опорное давление;  $p_{и.п1}$ ,  $p_{и.п2}$  — давления от измерительных преобразователей;  $k_1$ ,  $k_2$  — коэффициенты усиления сумматоров  $ДД_1$  и  $ДД_2$ .

Сигнал  $p_{вых,с}$  поступает на вход ПИ-регулятора, поддерживающего заданное соотношение сигналов:

$$k_1 (p_{и.п1} - p_0) - k_2 (p_{и.п2} - p_0) = 0 \quad (5.35)$$

или

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{p_{и.п1} - p_0}{p_{и.п2} - p_0} = k. \quad (5.36)$$

Соотношение  $k$  может изменяться регулирующими дросселями  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  от 0,1 до 10.

**Регуляторы соотношения с коррекцией по третьему параметру (ПРЗ.24 и ПРЗ.34).** В этих регуляторах один из пневматических сигналов поддерживается пропорциональным величине второго с изменением коэффициента пропорциональности в зависимости от третьего (рис. 5.32).



Давления  $p_{и.п1}$ ,  $p_{и.п2}$ ,  $p_{и.п3}$  от измерительных преобразователей, поделенные и скорректированные в узле соотношения, поступают на регулирующий блок, аналогичный регулятору ПР3.21 или ПР3.31.

Звено соотношения и коррекции состоит из функционального элемента 1 с регулируемым сопротивлением  $\alpha_3$  на линии питания, нерегулируемых сопротивлений  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , регулируемых сопротивлений  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и датчика опорного давления 2 с сопротивлением  $\gamma$ . Путем изменения проводимостей  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  формируются давления  $p_1$  и  $p_3$ . В свою очередь давление  $p_2$  при  $p_{и.п2} = \text{const}$  зависит от давления  $p_3$ . Начальный уровень устанавливается с помощью датчика 2, где поддерживается давление 0,02 МПа. Входными сигналами для регулирующего блока являются давления  $p_1$  и  $p_2$ .

Зависимость  $p_2$  и  $p_3$  при постоянных значениях  $p_{и.п2}$  не является единой для всех регуляторов. Специальные градуировочные характеристики прикладываются к каждому регулятору и действительны только при установленном положении сопротивления  $\alpha_3$  в линии питания элемента 1.

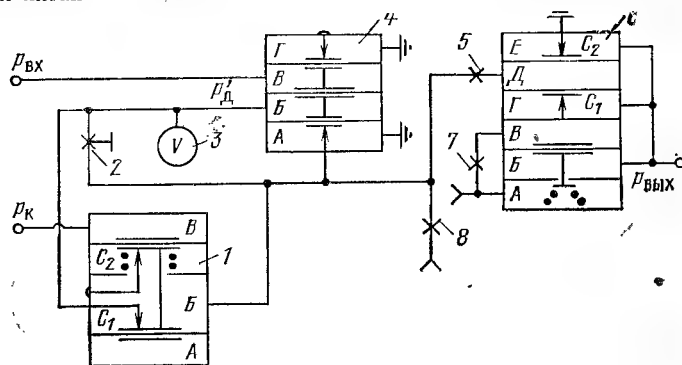


Рис. 5.33. Принципиальная схема устройства прямого предварения.

**Устройство прямого предварения (ПФ2.1).** Принципиальная схема ПФ2.1 приведена на рис. 5.33. Входной сигнал поступает в камеру Б элемента сравнения 4. Выходное давление  $p_{вых}$  через повторитель 6, регулируемое сопротивление 2 и емкость 3 подводится в камеру Б элемента 4 (апериодическое звено в цепи отрицательной обратной связи). В результате реализуется соотношение

$$p_{вых} = p'_д + T_d \frac{dp'_д}{dt}. \quad (5.37)$$

С учетом условия равновесия элемента 4  $p_{вх} = p'_д$  получим:

$$p_{рых} = p_{вх} + T_d \frac{dp_{вх}}{dt}. \quad (5.38)$$

Когда скорость отклонения параметра равна нулю или близка к нулю, на выходе элемента 4 отслеживается входной сигнал. Время предварения  $T_d$  устанавливается с помощью регулируемого сопротивления 2 в пределах от 0,05 до 10 мин. На схеме так же показаны реле переключения 1 и постоянные дроссели 5, 7, 8.

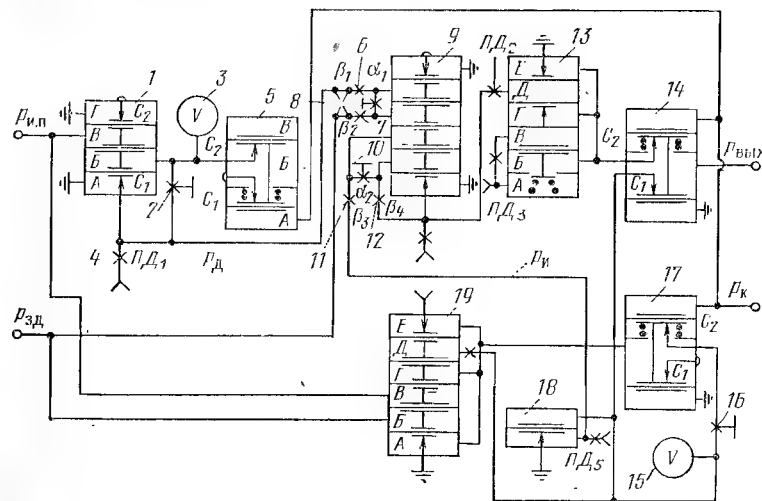


Рис. 5.34. Принципиальная схема регулятора ПР3.35.

**Пропорционально - интегрально - дифференциальный регулятор (ПР3.35).** Принципиальная схема регулятора приведена на рис. 5.34. Входной сигнал  $p_{и.п}$  поступает в камеру Б элемента сравнения 1. Давление  $p_d$  с выхода элемента 1 через регулируемое сопротивление 2 и емкость 3 заводится в камеру Б этого же элемента, образуя дифференцирующее звено в соответствии с выражением

$$p_d = p_{и.п} + T_d \frac{dp_{и.п}}{dt}. \quad (5.39)$$

Элемент сравнения 19, сопротивление 16, емкость 15, выключающее реле 17 и повторитель 18 образуют интегрирующее звено:

$$p_{и} = \frac{1}{T_c} \int_0^t (p_{и.п} - p_{зл}) dt. \quad (5.40)$$

Пропорциональное звено состоит из элементов 6—12 и реализуется по аналогии с П-звеном регулятора ПР3.31 в виде зависимости

$$p_{\text{вых}} = K_p(p_d - p_{\text{зд}}) + p_n, \quad (5.41)$$

а с учетом выражений для  $p_d$  и  $p_n$  получим:

$$p_{\text{вых}} = K_p(p_{\text{н.п}} - p_{\text{зд}}) + \frac{1}{T_c} \int_0^t (p_{\text{н.п}} - p_{\text{зд}}) dt + K_p T_d \frac{dp_{\text{н.п}}}{dt}, \quad (5.42)$$

где  $K_p$ ,  $T_c$ ,  $T_d$  — коэффициент усиления, постоянная интегрирования и время предварения.

Выходное давление с элемента 9 поступает на вход повторителя — усилителя мощности 13 в камеру Д, а затем через сопло  $C_2$  выключающего реле 14 — на выход регулятора. Выключающие реле 17 и 14, управляемые командным сигналом  $p_k$ , подготавливают процесс к плавному переходу на автоматическое регулирование, что предохраняет линию исполнительного механизма от скачка давления. Выключающее реле 5 служит для исключения действия дифференцирующего звена в переходных режимах.

**Малогобаритный пневматический регулятор (ПР3.27М).** Предназначен для реализации ПИД-закона регулирования и встраивается в электронные самопишущие приборы КС-4. Действие регулятора основано на компенсации перемещений.

Принципиальная схема регулятора представлена на рис. 5.35. Перемещение, пропорциональное величине рассогласования между параметром и заданием, подается на регулятор от прибора КС-4 через тягу 1, которая посредством рычажной системы перемещает штифт 2 и заслонку 3, вызывая изменение давления в линии сопла 4 и на выходе усилителя 5. Сигнал с выхода усилителя поступает через инерционное звено времени предварения (регулируемое сопротивление 10 и емкость 11) в сильфон 13 отрицательной обратной связи. Тяга 12 передвигает штифт 2 в направлении, необходимым для возвращения заслонки в исходное положение.

Одновременно сигнал из линии отрицательной обратной связи поступает через реле 7 на звено изодрома (сопротивление 8 и емкость 9), соединенное с сильфоном положительной обратной связи 14. Давление в сильфонном узле и на выходе регулятора через реле 6 будет увеличиваться до тех пор, пока на входе регулятора есть сигнал рассогласования. Корректирующее действие изодрома происходит со скоростью, определяемой величиной рассогласования и степенью открытия сопротивления 8.

Настройка предела пропорциональности (коэффициента усиления регулятора) осуществляется путем изменения степени воздей-

ствия на узел «сопло-заслонка» величин входного перемещения и перемещения от сильфонов обратной связи; устанавливается с помощью диска с указателем, перемещающимся по шкале предела пропорциональности.

Конструкция регулятора выполнена на элементном принципе (кроме узлов сильфонов с узлом настройки предела пропорциональности, регулятор выполнен на элементах УСЭППА). Регулятор сконструирован так, что удобно устанавливается в корпусе КС-4.

Граничные значения диапазона настройки предела пропорциональности 6 от 5 до 400%, времени изодрома от 0,1 до 100 мин, времени предварения от 0,05 до 8 мин.

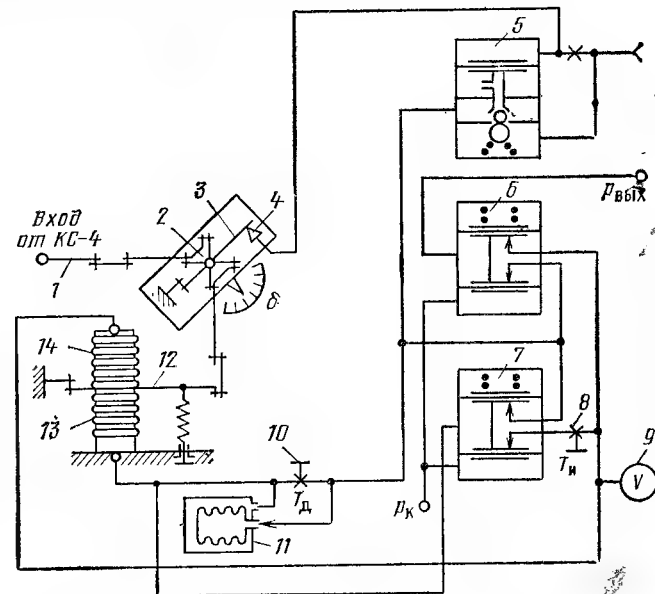


Рис 5.35. Принципиальная схема регулятора ПР3.27М.

**Пневматические регулирующие устройства с переменной структурой (ПР5.1, ПР5.2, ПР5.3).** Устройства рекомендуются при автоматизации объектов с большим транспортным запаздыванием, где имеются частые и значительные возмущения, а также на объектах, структурно не устойчивых.

Регулятор ПР5.1 автоматически изменяет свои параметры настройки в зависимости от знака алгебраической суммы модуля ошибки регулирования и производной модуля ошибки с весовыми коэффициентами. При отклонении параметра от задания в регуляторе автоматически включаются форсированные параметры настрой-

ки (бóльшие значения коэффициента усиления и меньшие значения времени изодрома), тем самым происходит активное воздействие выходного сигнала регулятора на исполнительный механизм.

Регулятор ПР5.1 построен на элементах УСЭППА, смонтированных на плате, в которой находятся коммуникационные каналы. Регулятор состоит из регулирующей и логической частей. Регулирующая часть осуществляет ПИ-закон регулирования для умеренного и форсированного режимов. Настраиваемые параметры в зависимости от характера отклонения параметра от задания переключаются по дискретному сигналу логической части. Логическая часть определяет знак алгебраического выражения вида

$$S = \pm \alpha |\varepsilon| + T_d |\varepsilon'|, \quad (5.43)$$

где  $|\varepsilon|$  — модуль сигнала ошибки;  $|\varepsilon'|$  — производная модуля сигнала ошибки;  $T_d$  — постоянная времени логической части регулятора;  $\alpha$  — постоянный коэффициент.

Кроме жесткого логического закона переключения настроек регулятора возможен и другой. Для этого имеющийся в регуляторе переключатель устанавливается в положение «внешняя логика», и на регулятор поступает дискретный сигнал от внешней логики, в том числе в случае необходимости, — и от управляющей вычислительной машины.

В регуляторе ПР5.2 в отличие от рассмотренного коэффициент усиления может изменяться также в зависи-

Таблица 5.2. Технические характеристики регуляторов с переменной структурой

| Наименование                                      | Тип регулятора |          |          |
|---------------------------------------------------|----------------|----------|----------|
|                                                   | ПР5.1          | ПР5.2    | ПР5.3    |
| Диапазон настройки предела пропорциональности, %: |                |          |          |
| в умеренном режиме                                | 100—800        | 100—500  | 100—500  |
| в форсированном режиме                            | 5—100          | 5—100    | 5—100    |
| Диапазон настройки времени изодрома, мин:         |                |          |          |
| в умеренном режиме                                | 0,1—100        | 0,1—100  | 0,1—100  |
| в форсированном режиме                            | 0,05—100       | 0,05—100 | 0,05—100 |
| Диапазон настройки времени предварения, мин       | —              | —        | 0,05—10  |
| Класс точности                                    | 1,0            | 1,0      | 1,0      |

мости от знака ошибки  $\varepsilon$ . В свою очередь регулятор ПР5.3 отличается от ПР5.2 наличием дифференцирующей составляющей в регулирующем воздействии (ПИД-закон регулирования).

Технические данные рассмотренных регуляторов приведены в табл. 5.2.

## 5.5. Пневматические исполнительные механизмы и линии связи

В пневматических исполнительных механизмах перестановочное усилие создается за счет действия давления сжатого воздуха на мембрану, поршень или сильфон. Соответственно различаются мембранные, поршневые и сильфонные исполнительные механизмы, которые могут быть пружинными и беспружинными.

В пружинных механизмах перестановочное усилие в одном направлении создается силой давления сжатого воздуха, а в обратном направлении — силой упругости сжатой пружины, т. е. значительная часть усилия, создаваемого за счет действия давления, тратится на сжатие пружины.

От этого недостатка свободны беспружинные исполнительные механизмы, в которых перестановочное усилие в противоположных направлениях создается действием давления с обеих сторон мембраны или поршня; давление с одной стороны возрастает, а с другой — уменьшается или же наоборот.

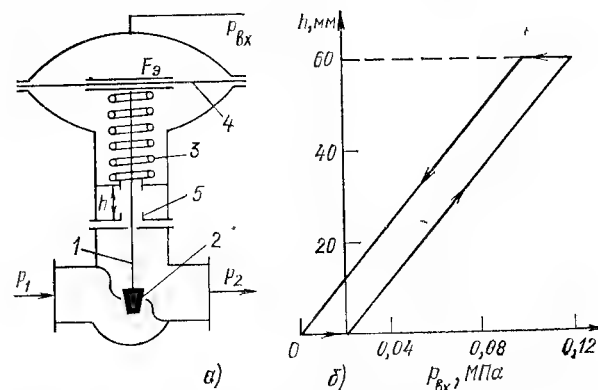


Рис. 5.36. Пневматический мембранный исполнительный механизм. а — принципиальная схема; б — статическая характеристика.

Сильфонные исполнительные механизмы применяют для создания небольших перестановочных усилий. Прямолинейные мембранные пружинные и беспружинные механизмы, дополненные рычажной передачей, обеспечивают поворотное перемещение.

**Мембранные исполнительные механизмы.** Принципиальная схема мембранного исполнительного механизма приведена на рис. 5.36,а. Перемещение выходного штока 1, соединенного с регулирующим органом 2, в одну сторону осуществляется силой, которая создается давлением  $p_{вх}$ , в другую — усилием от пружины 3. Сигнал  $p_{вх}$  поступает в герметическую мембранную головку, в которой находится мембрана 4 из прорезиненной ткани толщиной 2—4 мм с жестким центром. Снизу на мембрану давит пружина 3. Мембранные исполнительные механизмы классифицируются по размерам мембранных головок. Статические характеристики большинства механизмов близки к линейным, однако почти всегда наблюдается гистерезис (2—15% от максимального значения  $p_{вх}$ ).

Величина гистерезиса зависит от усилий в уплотняющем сальнике 5, от перепада давлений  $p_1 - p_2$  на регулирующем органе и от эффективной площади мембраны  $F_3$ . Статическая характеристика приведена на рис. 5.36,б (максимальное перемещение штока  $h$  обычно не превышает 60 мм). Следует отметить, что для мембранных исполнительных механизмов с большими  $F_3$  влияние трения в сальнике и перепада давления  $p_1 - p_2$  на величину гистерезиса незначительно (зона гистерезиса составляет 1—3% и практически не влияет на качество переходных процессов системы регулирования). Однако из-за большого объема мембранной камеры динамические характеристики таких исполнительных механизмов приближаются к характеристикам аperiodического звена, что значительно снижает качество регулирования.

В динамическом отношении механизмы с величиной гистерезиса менее 2% можно считать усилительными звеньями при частотах  $\omega < \omega_H \approx 0,3$  рад/с. Если же зона гистерезиса достигает 3—5%, то  $\omega_H$  уменьшается до 0,03—0,05 рад/с. Для уменьшения зоны гистерезиса и улучшения динамических характеристик на исполнительный механизм устанавливают специальные усилители давления с обратной связью по положению штока привода, называемые позиционерами.

Позиционеры по принципу действия подразделяются на позиционеры, работающие по схеме компенсации перемещений и по схеме компенсации усилий. При установке позиционера на мембранном исполнительном механизме используется принцип глубокой обратной связи (см. § 2.2).

Позиционер П-1 (рис. 5.37), работающий по схеме компенсации перемещений, имеет сильфонный чувствительный элемент 1, в который поступает командный сигнал с выхода пневматического регулирующего устройства. Изменения этого сигнала приводят к перемещениям дна сильфона и золотника 2. Последний сообщает полость над мембраной исполнительного механизма с атмосферой (при ходе вниз), либо с линией питания (при ходе вверх).

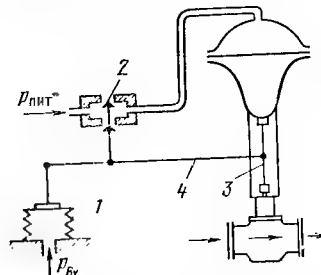


Рис. 5.37. Принципиальная схема позиционера, работающего по принципу компенсации перемещений.

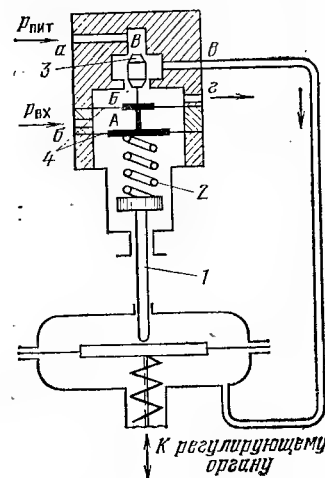


Рис. 5.38. Принципиальная схема позиционера, работающего по принципу компенсации усилий.

Рост или уменьшение давления над мембраной продолжается до тех пор, пока под его действием шток 3 не переместится настолько, что при помощи рычагов 4 вновь поставит золотник 2 в нейтральное положение. Новое положение штока будет при этом определяться характеристиками сильфона и рычажной системы позиционера, т. е. не будет зависеть от трения в подвижной системе механизма.

Позиционер ПР-10 (рис. 5.38) построен с использованием чувствительного элемента и действует по принципу силовой компенсации. Входной пневматический сигнал  $p_{вх}$ , поступая от регулирующего устройства через штуцер б в камеру А, развивает на мембранном блоке 4 направленное вниз усилие. На шток того же мембранного блока передается усилие сжатия пружины 2, направленное вверх.

Нарушение равновесия усилий, действующих на блок, приводит к его перемещению, а следовательно, и к изменению степени открывания сбросного и питающего клапанов золотником 3 в камере В. Это в свою очередь вызывает изменение давления в линии, идущей через штуцер в на мембрану исполнительного механизма, которое будет продолжаться до тех пор, пока перемещение штока

через рычаг 1 обратной связи и пружину 2 не восстановит равенство сил на элементе сравнения, т. е. новое положение штока определяется лишь кинематической системой обратной связи и характеристикой пружины 2 и не зависит от трения в подвижной системе. Погрешность в отработке положения штока исполнительного механизма при применении позиционера ПР-10 не превышает в статике 1%.

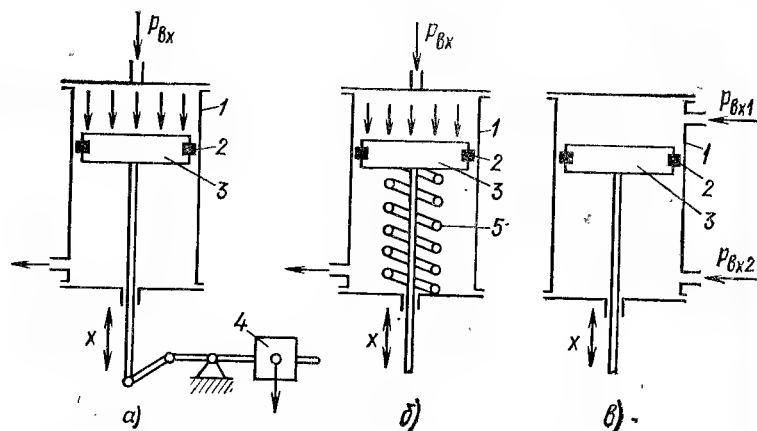


Рис. 5.39. Схемы поршневых исполнительных механизмов.  
а — с уравнивающим грузом; б — с уравнивающей пружиной; в — с подачей разности давлений.

Величина гистерезиса для мембранных исполнительных механизмов с позиционерами уменьшается до 1—1,5%, а область нормальных режимов расширяется до  $\omega_n = 0,5$  рад/с. Позиционеры целесообразно применять при значительном удалении исполнительного механизма от пневматического регулятора. Позиционеры, работающие по схеме компенсации перемещений, применяются в основном для мембранных исполнительных механизмов, имеющих большой ход штока (25—100 мм), а позиционеры, построенные по схеме компенсации усилий, — для мембранных механизмов, ход штока которых составляет 7—25 мм.

**Поршневые исполнительные механизмы** в отличие от мембранных позволяют получить большое перемещение штока, что в некоторых случаях определяет целесообразность их применения. Основные элементы поршневых исполнительных механизмов (рис. 5.39) — поршень 3 и цилиндр 1, герметичность между трущимися поверхностями которых обеспечивается манжетой 2. Под действием входного давления на поршне развивается усилие,

которое будет поступательно перемещать регулирующий орган.

Конструктивно поршневые исполнительные механизмы могут быть выполнены различными способами. В одних (рис. 5.39, а, б) воздух подводится к поршню с одной стороны, а сила, развиваемая при этом поршнем, уравнивается либо противодействием груза 4 (рис. 5.39, а), либо силой упругой пружины 5 (рис. 5.39, б). В других (рис. 5.39, в) перемещение поршня осуществляется под действием поступающих давлений

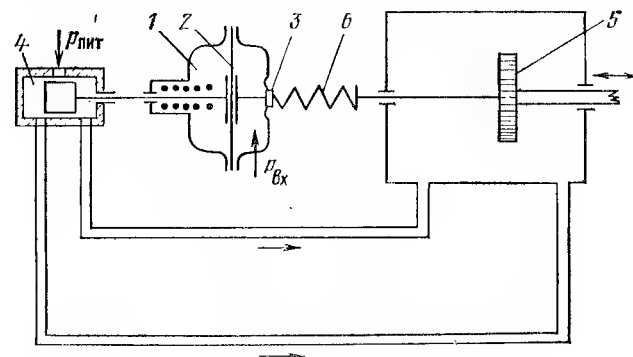


Рис. 5.40. Схема поршневого следящего привода.

ний  $P_{вх1}$  и  $P_{вх2}$  в ту или другую полость цилиндра. Для увеличения точности и уменьшения инерционности поршневых исполнительных механизмов их, как и мембранные, дополняют позиционерами. Такие поршневые приводы называют следящими.

На рис. 5.40 приведена схема поршневого следящего привода с мембранно-золотниковым позиционером.

Поршневой следящий привод состоит из исполнительного механизма 1, имеющего большую 2 и малую 3 мембраны, золотника 4 с тремя клапанами, поршневого механизма 5 с пружинной отрицательной обратной связью 6. При увеличении  $P_{вх}$  золотник смещается влево и давление питания  $P_{пит}$  поступает в левую полость цилиндра 5, перемещая поршень вправо и увеличивая натяжение пружины обратной связи до установления нового состояния равновесия. Зона нечувствительности в поршневом следящем приводе равна 0,5%, полное время перемещения 4 с (при отсутствии нагрузки). В области частот  $0 \leq \omega \leq 0,6$  рад/с поршневой следящий привод можно рассматривать как пропорциональное звено.

**Пневматические линии связи.** Все элементы и устройства пневмоавтоматики соединяются пневматическими линиями связи (пневмопроводами). Пневмопровод мо-

Пневмопроводы представляют собой металлические или пластмассовые трубки внешним диаметром 4—8 мм, либо каналы круглого, прямоугольного или квадратного сечения, выполненные в металлических, пластмассовых или из органического стекла пластинах. Для удобства монтажа пневмопроводов применяют пневмокабели — несколько пластмассовых трубок, заключенных в общий гибкий кожух.

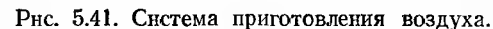
Наиболее важными характеристиками пневмопроводов являются динамические характеристики, определяющие время передачи сигнала. При больших длинах пневматических линий объем и сопротивление трубки начинают оказывать влияние на динамические свойства АСР. Несмотря на то, что длинный пневмопровод представляет собой объект с распределенными параметрами, экспериментальные исследования динамики безрасходных пневмопроводов показывают, что они с достаточной для практических целей точностью могут быть аппроксимированы совокупностью двух последовательно соединенных звеньев: звена транспортного запаздывания и апериодического звена первого порядка:

(5.44)

208

**Таблица 5.3. Характеристики пневматических импульсных линий**

На промышленных предприятиях, где применяются пневматические системы, имеется центральная сеть питания приборов сжатым воздухом. В настоящее время рабочий диапазон входных и выходных пневматических сигналов, в большинстве систем пневмоавтоматики принимаемый за стандартный, составляет 0,02—0,1 МПа, давление питания сжатого воздуха 0,14 МПа с отклонениями  $\pm 10\%$  от номинального значения.



На рис. 5.41 представлен один из вариантов системы приготовления воздуха, включающей в себя фильтр воздуха 1, подаваемого

на сжатие в компрессоры 2, холодильник 3, приемники (ресиверы) 4, маслоотделитель 5, систему осушки воздуха 6, регулятор давления воздуха 7, обратные клапаны 8. В особо ответственных системах управления устанавливается аварийный компрессор 9, который автоматически включается при падении давления в системе воздухообеспечения ниже допустимого предела. Несмотря на очистку воздуха в системе приготовления, практически всегда применяют дополнительную очистку, осуществляемую в приборных фильтрах. Приборные фильтры, как правило, устанавливаются перед каждым устройством, причем, они должны быть установлены перед стабилизатором давления, так как давление воздуха при прохождении через фильтр значительно снижается.

## 5.6. Устройства оперативного управления в пневматических системах регулирования

Станция управления регулирующими устройствами систем «Старт» встраивается непосредственно во вторичные приборы, осуществляющие непрерывную запись регулируемого параметра и его показание, а также показание задания от ручного или программного задатчика и показание давления на исполнительном механизме.

Станция управления позволяет переводить процесс с ручного управления исполнительным механизмом на автоматическое или автоматическое программное регулирование. Приборы, имеющие встроенную станцию управления, содержат унифицированный измерительный блок, который рассчитан для показания и записи одного параметра (ПВ10.1Э, ПВ10.1П) соответственно с электрическим и пневматическим приводом диаграммы. При показании и записи двух параметров (ПВ10.2Э, ПВ10.2П) в прибор встраивается соответствующее количество аналогичных измерительных блоков. Действие измерительных блоков рассмотрено в § 5.2. Схема, поясняющая режимы работы станции управления и переход с одного режима на другой, представлена на рис. 5.42.

Станция управления комплектуется из ручного задатчика (узел I) и переключателя (узлы II и III). Задатчик и переключатель построены на элементах УСЭППА, смонтированных на специальной плате. Узел задатчика предназначен для установки задания при автоматическом регулировании и изменения положения клапана исполнительного механизма при ручном управлении и состоит из элементов аналоговой техники — задатчика 1, усилителя мощности 2, нерегулируемого пневмосопротивления (постоянного дросселя) 3 на линии питания.

Задатчик 1 закрепляется на передней стенке прибора, усилитель 2 и сопротивление 3 монтируются на плате. Установка задания производится с помощью настроечного винта, ручка которого выводится на переднюю панель прибора.

Усиленное по мощности выходное давление задатчика идет на переключатель, а затем на указатель шкалы.

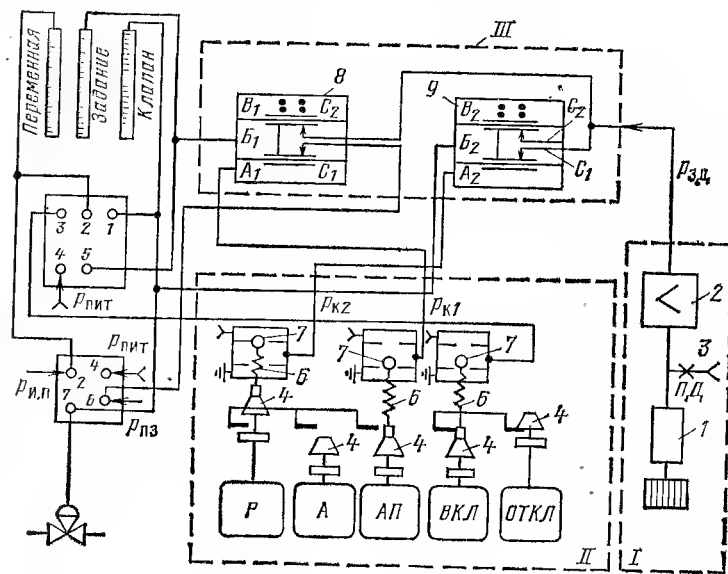


Рис. 5.42. Принципиальная схема станции управления. С помощью переключателя осуществляется плавный переход на три различных режима ведения технологического процесса в системе регулирования:

*ручного управления процессом «Р»*, когда к исполнительному механизму подключается непосредственно задатчик;

*автоматического регулирования «А»*, при котором исполнительным механизмом управляет регулятор, а задание регулятору устанавливают задатчиком;

*автоматического программного регулирования «АП»*, отличающееся тем, что задание является переменной величиной, поступающей на регулятор от программного задатчика, корректирующего регулятора или от управляющей вычислительной машины (УВМ) через специ-



альный электропневматический преобразователь. Собственный датчик при этом оказывается отключенным.

Переключатель (см. рис. 5.42) состоит из кнопочного механизма II и узла платы с выключающими реле III. Кнопочный механизм служит для подачи сигнала команды на соответствующее выключающее реле. Если кнопка не включена, то воздух из канала питания проходит в реле переключения. При включении кнопки конус 4 входит за выступ 5, который поджимается к поверхности конуса пружины. Шток конуса пружины 6 отталкивает шарик 7, в результате чего закрывается клапан питания, а выключающее реле сообщается с атмосферой. При включении соответствующей кнопки рычаг 5 отходит, освобождая конус предыдущей кнопки, которая под действием пружины 6 возвращается в исходное положение.

Двухсопельные выключающие реле 8 и 9 управляют командами сигналами  $p_{к1}$  и  $p_{к2}$ , подаваемыми в камеры  $A_1$  и  $A_2$  от соответствующих кнопок. При  $p_{к}=0$  под действием пружины открыто сопло  $C_2$ . Когда  $p_{к}=1$ , закрывается сопло  $C_1$ , но открывается сопло  $C_2$ . Таким образом, выход реле в зависимости от давления команды  $p_{к}$  соединяется либо с одним, либо с другим соплом.

Станция управления имеет пять кнопок. Слева три кнопки соответствуют ручному управлению («Р»), автоматическому регулированию («А») и автоматическому программному регулированию («АП»). Две кнопки, расположенные справа, управляют включением регулятора («ВКЛ» и «ОТКЛ»). Во всех промежуточных положениях и при ручном управлении регулятор должен быть отключен.

На примере прибора ПВ10.1Э рассмотрим последовательную работу переключателя во всех названных режимах.

**Ручное управление «Р».** Исполнительным механизмом управляет непосредственно ручной датчик. Нажаты две кнопки: кнопка с индексом «Р» и кнопка регулятора «ОТКЛ». Камера  $A_2$  реле 9 сообщается с атмосферой ( $p_{к2}=0$ ), сопло  $C_1$  открыто, сопло  $C_2$  закрыто. В реле 8 под действием давления питания ( $p_{к1}=1$ ), проходящего в камеру  $A_1$  из кнопки «АП», сопло  $C_1$  закрыто, а сопло  $C_2$  открыто. Задание от ручного датчика через сопло  $C_1$  реле 9 поступает в камеру  $B_2$ , а из нее через штуцер 7 на исполнительный механизм и на шкалу «клапан»; через открытое сопло  $C_2$  реле 8 оно проходит на шкалу «задание» и через штуцер 5 на вход регулятора.

Переменная (давление  $p_{п.п}$ ) подводится к штуцеру 2, подается на шкалу «переменная» и в регулятор. При ручном управлении программный датчик (давление  $p_{п.з}$ ) не оказывает влияния на процесс регулирования, так как сопло  $C_1$  реле 8 закрыто. В отключающее реле на выход регулятора (штуцер 3) поступает отключающий командный сигнал.

**Промежуточное положение при переходе с ручного на автоматическое регулирование «Р — А».** Сначала, до включения регулятора, следует нажать кнопку «А», что вызовет возвращение кнопки «Р» в исходное положение. Затем, при отключенном регуляторе (кнопка «ОТКЛ» нажата) нужно, следя по шкалам задания и переменной, установить давление задания равным переменной. Из кнопки «Р» воздух питания пройдет в камеру  $A_2$  реле 9 и закроет сопло  $C_1$ , связанное с исполнительным механизмом. Таким образом, датчик отключается от клапана, а регулятор будет подготовлен к переходу на автоматическое регулирование.

**Автоматическое регулирование «А».** Следует включить регулятор, нажав кнопку «ВКЛ». В камерах  $A_1$  и  $A_2$  реле 8 и 9 установится давление питания, сопла  $C_1$  закрыты, сопла  $C_2$  — открыты. Выключающее реле регулятора через кнопку «ВКЛ» и штуцер 3 соединено с атмосферой, а выход регулятора через штуцер 1 — с исполнительным механизмом и его шкалой «клапан». Задание от ручного датчика поступает через сопло  $C_2$  элемента 8 на регулятор (штуцер 5) и шкалу «задание». Программное задание  $p_{п.з}$ , также как и в предыдущем случае, закрыто подпором в камере  $A_1$  реле 8.

**Промежуточное положение при переходе с автоматического «А» на автоматическое программное «АП» регулирование.** При включенной кнопке «А» отключают регулятор (в его выключающее реле через штуцер 3 поступает питание из кнопки «ВКЛ»). На шкалу «задание» и в регулятор через штуцер 5 идет сигнал от ручного датчика. Во избежание значительного толчка в линии исполнительного механизма необходимо следить за давлением программного датчика  $p_{п.з}$  (если программный датчик не имеет шкалы, можно наблюдать его показания по шкале задания прибора контроля, нажав кнопку «АП» при отключенном регуляторе) и включить регулятор в тот момент, когда давление программы  $p_{п.з}$  сравняется с давлением от ручного датчика  $p_{зд}$ .

**Автоматическое программное регулирование «АП».** Нажаты кнопки «АП» и «ВКЛ», закрыто сопло  $C_1$  реле 9, а сопло  $C_1$  реле 8 открыто, поскольку камера  $A_1$  реле 8 через кнопку «АП» соединяется с атмосферой. Через сопло  $C_1$  реле 8 давление от программного датчика  $p_{п.з}$  поступает через штуцер 5 в регулятор и на шкалу «задание». Ручной датчик отключается от регулятора и от шкалы прибора, поскольку сопла, с которыми соединен ручной датчик ( $C_1$  реле 9 и  $C_2$  реле 8), закрыты. Исполнительным механизмом по заданной программе управляет регулятор — его выключающее реле через кнопку «ВКЛ» и штуцер 3 соединено с атмосферой.

**Переход с программного регулирования «АП» на автоматическое «А».** Сначала следует отключить регулятор, затем нажать кнопку «А» и установить ручным датчиком давление  $p_{зд}$ , равное давлению на программном датчике  $p_{п.з}$  в момент отключения его. После этого включают регулятор.

**Переход с автоматического регулирования «А» на ручное управление «Р».** Как и во всех промежуточных положениях, выключают регулятор, но остается включенной кнопка «А». При этом



и регулятор, и ручной задатчик отключены от исполнительного механизма. По шкале задания ручным задатчиком устанавливают давление, равное давлению на шкале клапана, после чего можно, нажав кнопку «Р», перейти на ручное управление процессом.

### 5.7. Устройства статического преобразования информации и реализации логических операций

При решении задач автоматизации часто возникает необходимость в проведении различных вычислительных и логических операций с пневматическими сигналами. По функциональному признаку эти устройства относятся к группе преобразования, обработки и хранения информации. Рассмотрим несколько подробнее некоторые из этих устройств.

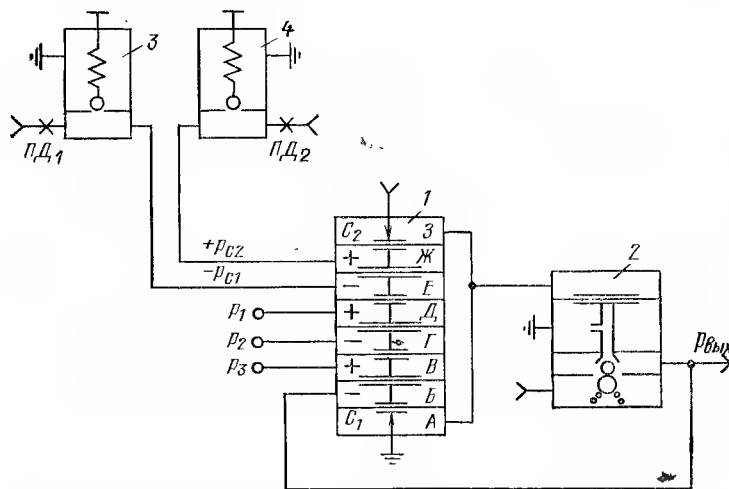


Рис. 5.43. Принципиальная схема прибора алгебраического суммирования.

**Устройство алгебраического суммирования (ПФ1.1).** Устройство входит в систему «Старт» и предназначено для алгебраического суммирования до трех стандартных пневматических сигналов  $p_1, p_2, p_3$  (два со знаком «плюс» и один со знаком «минус»). Кроме того, на вход устройства может поступать сигнал смещения  $p_{см}$ , настраиваемый вручную в диапазоне  $\pm 0,1$  МПа:

$$p_{вых} = p_1 - p_2 + p_3 + p_{см}. \quad (5.45)$$

В состав устройства (рис. 5.43) входят семимембранный усилитель давления 1 и усилитель мощности 2, соединенные последо-

вательно и охваченные общей отрицательной обратной связью, а также два задатчика 3 и 4 с нерегулируемыми пневмоспротивлениями  $ПД_1$  и  $ПД_2$  для настройки сигнала смещения

$$p_{см} = p_{с2} - p_{с1}. \quad (5.46)$$

Принцип действия устройства аналогичен действию мембранного усилителя давления, охваченного отрицательной обратной связью. Единственным параметром настройки является смещение  $p_{см}$ , выбираемое таким, чтобы избежать нарушения стандартного диапазона давлений на выходе устройства.

**Устройство извлечения квадратного корня (ПФ1.17).** Устройство входит в систему «Старт» и служит для извлечения квадратного корня из сигнала, поступающего на его вход.

Обычно устройство извлечения квадратного корня используется для спрямления квадратичных характеристик дифманометрических датчиков расхода жидкостей или газов и включается в контур регулирования между измерительным преобразователем (датчиком) и регулятором.

Принцип действия устройства основан на реализации параболической зависимости вида  $p_{вых} = \sqrt{0,8(p_{вх} - 0,02) + 0,02}$ , МПа путем аппроксимации кривой отрезками прямых линий. При этом график функции разбивается по оси  $p_{вых}$  на три интервала, в пределах каждого из которых исходная функция заменяется отрезком прямой:

$$p_{выхi} = k_i p_{вх} + p^0_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5.47)$$

Угловые коэффициенты  $k_i$  и смещение  $p^0_i$  подбираются соответствующим образом.

Принципиальная схема устройства ПФ1.17 представлена на рис. 5.44.

Уравнение прямой каждого  $i$ -го интервала разбиения реализуется с помощью дроссельных делителей ДС1 и ДС2 и одномоembrанных повторителей 1, 2, 3 со сдвигом (цепочка, реализующая уравнение прямой для первого интервала, дроссельного делителя не имеет).

Проходя через дроссельные делители, входной сигнал  $p_{вх}$  умножается на соответствующие угловые коэффициенты  $k_i$  (для первого интервала  $k_1 = 1$ ). Необходимые значения смещений  $p^0_i$  обеспечиваются с помощью опорного давления 0,06 МПа, поддерживаемого задатчиком 8 после регулируемых дросселей 5 и 7 и за счет надлежащей настройки пружинного сдвига в элементах 1, 2 и 3.

Выходные камеры элементов 1—3 объединены общим коллектором, соединенным через дроссель 12 с источником питания. Сигнал в коллекторе поступает на усилительный каскад, состоящий из трехмембранного элемента 9 и усилителя мощности 10, которые

охвачены общей отрицательной обратной связью. На выходе каскада и устройства в целом формируется сигнал  $p_{\text{вых}}$ , отслеживающий с небольшим усилением по давлению ( $k_y \approx 1,18$ ) изменение  $p'_{\text{вых}}$  в коллекторе.

**Устройство селектирования большего или меньшего сигнала (ПФ4/5.1).** Устройство предназначено для сравнения двух пневматических сигналов и выдачи сигнала, равного большему или меньшему из них в зависимости от настройки (рис. 5.45).

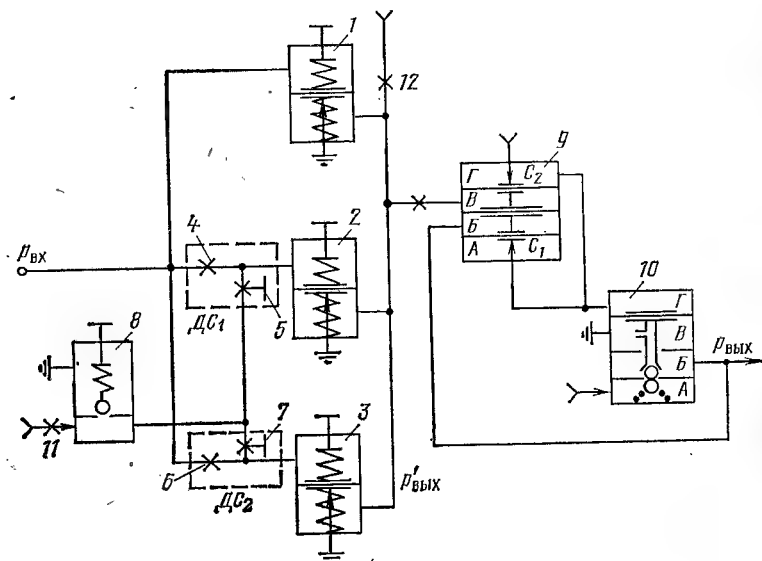


Рис. 5.44. Принципиальная схема прибора извлечения квадратного корня.

Прибор ПФ4/5.1 состоит из трехмембранного реле 2, задатчика 5, двух элементов сравнения 1 и 3, усилителя 4 и пневматического сопротивления ПД<sub>1</sub>. В случае селектирования большего сигнала соединены б и в, а и г каналы переключателя. Давление  $p_1$  поступает в камеру В элемента 1 и одновременно к соплу  $C_2$  реле 2; давление  $p_2$  — в камеру В элемента 1 и к соплу  $C_1$  реле 2. Выходное давление элемента 1 подается в камеру В реле 2, а в камеру В реле подается постоянное давление подпора, равное 0,06 МПа и устанавливаемое с помощью задатчика 5.

Если  $p_1$  больше  $p_2$ , на вход реле 2 пройдет давление  $p_1$ . Далее сигнал усиливается по мощности и поступает на выход устройства. Если  $p_1$  меньше  $p_2$ , то на выходе будет сигнал  $p_2$ . В случае селектирования меньшего сигнала соединены каналы переключателя б и г, а и в. Погрешность повторения селектированного сигнала не превышает 0,5% от максимального значения.

**Устройство ограничения сигналов (ПП11.1).** Устройство предназначено для ограничения по максимуму или по минимуму пневматических сигналов, поступающих на его вход (рис. 5.46).

Конструктивно устройство ПП11.1 состоит из двух элементов сравнения 1 и 2, усилителя мощности 4, выключающего реле 3, двух постоянных дросселей 6 и 7 и маломощного задатчика 5.

Давление входного сигнала  $p_{\text{вх}}$  и давление задания  $p_{\text{зд}}$ , поступающие к двум соплам реле 3 и в две камеры элемента сравнения 1, создают на мембранах элемента сравнения усилия, направленные в противоположные стороны. Результирующая этих усилий устанавливает мембранный узел элемента 1 в положение, при котором управляющий сигнал пропускает через реле 3 на выход устройства либо входное давление, либо давление задания. При

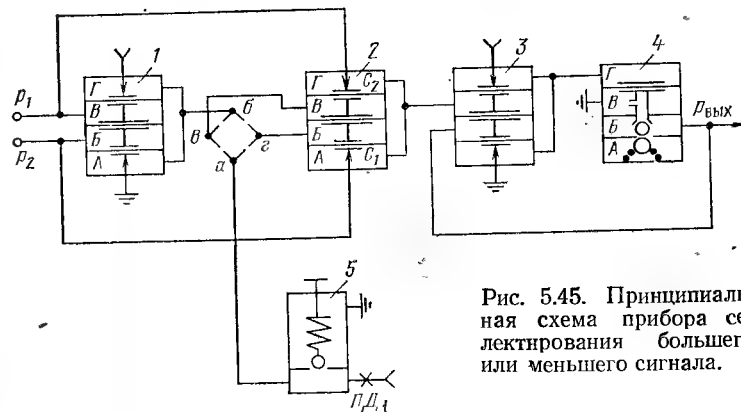


Рис. 5.45. Принципиальная схема прибора селектирования большего или меньшего сигнала.

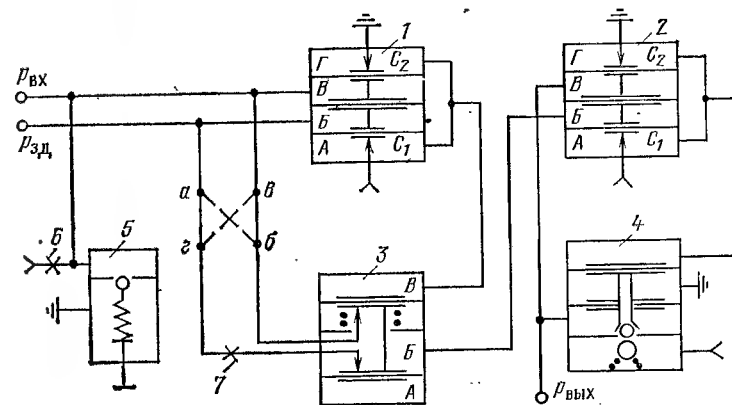


Рис. 5.46. Принципиальная схема прибора ограничения сигналов.

настройке на максимум соединены каналы переключателя  $a-b$  и  $в-г$ . Величина  $p_{ад}$  при этом определяет максимальное давление, которое пропускает устройство. Как только входной сигнал превысит давление задания, на выходе элемента 1 и в камере В реле 3 появится давление питания, под действием которого закроется сопло  $C_2$  реле 3 и откроется сопло  $C_1$ . На усилительное звено (2, 4) пройдет максимальное значение сигнала, равное давлению задания. При настройке на минимум соединены каналы  $б-в$  и  $а-г$ .

Кроме рассмотренных имеются устройства умножения (ПФ1.9), осуществляющие операцию умножения входного параметра на постоянный коэффициент в пределах от 0,2 до 0,9 и от 1,1 до 5; множително-делительные устройства (ПФ1.18), осуществляющие перемножение двух параметров и деление их произведения на третий параметр, а также деление меньшего параметра на больший; устройство возведения параметра в квадрат и ряд других устройств.

**Логические устройства.** Реализация логических операций в пневматических системах управления осуществляется на дискретных пневматических элементах, работа которых описывается правилами алгебры логики на основе элементарных функций И, ИЛИ и НЕ.

Функция И, называемая конъюнкцией двух переменных  $x_1$  и  $x_2$  (обозначается знаком  $\wedge$ ), отличается тем, что принимает значение, равное 1, тогда, когда оба аргумента  $x_1$  и  $x_2$  одновременно принимают значение, равное 1. При всех других сочетаниях  $x_1$  и  $x_2$  значение этой функции равно 0.

Функция ИЛИ, называемая дизъюнкцией двух переменных (обозначается знаком  $\vee$ ), отличается тем, что принимает значение, равное 0, тогда и только тогда, когда оба аргумента  $x_1$  и  $x_2$  равны 0. При всех других сочетаниях аргументов  $x_1$  и  $x_2$  ее значение равно 1.

Функция НЕ, называемая отрицанием или инверсией переменной  $x_1$  (обозначается черточкой над аргументом  $\bar{x}_1$ ), отличается тем, что при значении аргумента  $x_1=1$  значение функции равно 0, а при  $x_1=0$  значение функции равно 1. Названные функции в пневмоавтоматике реализуются на базе пневматических реле.

Наибольшее распространение получили трехмембранные пневматические реле, которые входят в состав УСЭППА и являются основными дискретными элементами. На одном таком реле могут быть реализованы все названные элементарные логические функции.

Реле по своей схеме ничем не отличается от пневматических двухвходовых усилителей давления (элементов сравнения). Конструк-

тивно различие состоит в том, что реле имеют меньшую чувствительность и более простую конструкцию управляемых пневмосопротивлений «сопло-заслонка».

Трехмембранное реле (рис. 5.47, а, б) состоит из мембранного блока и двух управляемых пневмосопротивлений «сопло-заслонка». Сопла 1 в реле выполнены в виде отверстий в стенках нижней и верхней крышек. Заслонки 2 закреплены на концах жесткого центра и отливаются вместе с мембранами 3 из резины. На вход реле подаются два давления:  $p_{упр1}$  и  $p_{упр2}$ , одно из давлений поддерживается постоянным (давление подпора), другое (давление управления) может принимать два дискретных значения: 0 или 1.

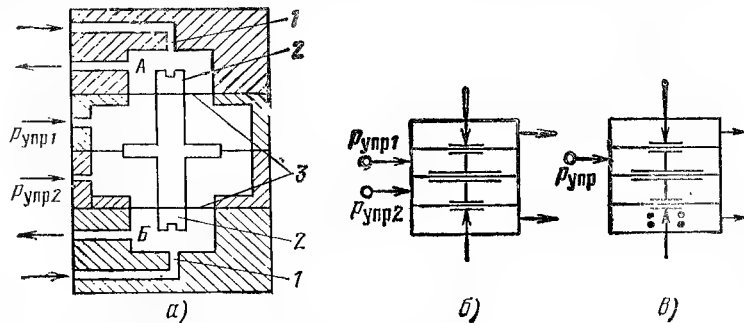


Рис. 5.47. Трехмембранное пневматическое реле.  
а — конструктивная схема; б, в — условное изображение.

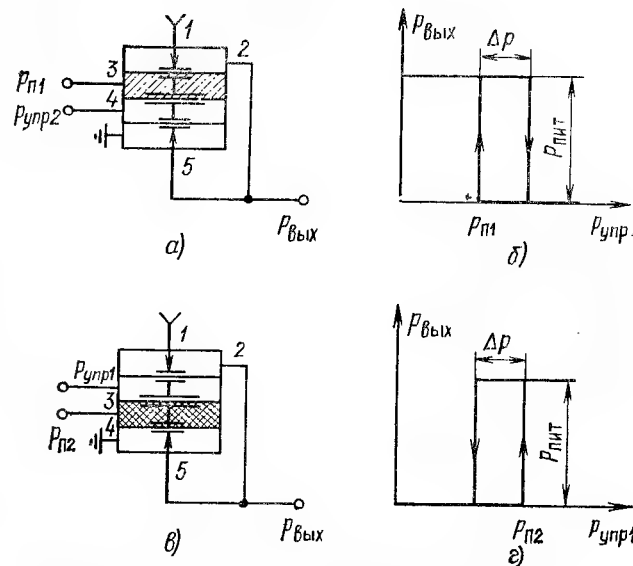


Рис. 5.48. Реле с петлеобразной характеристикой.

Давление подпора может составлять 30% (малый подпор) или 80% (большой подпор) от максимального и выбирается в зависимости от схемы включения реле (на схемах малый подпор изображается одинарной, а большой — двойной штриховкой).

Усилие, возникающее на мембранах в результате действия на них давления подпора и давления управления, обуславливает перемещение жесткого центра вверх или вниз в зависимости от результирующего усилия. Если усилие направлено вверх, то размыкается контакт А (заслонка полностью закрывает сопло, и сопротивление для прохода сигнала равно бесконечности), а контакт В замыкается (заслонка отведена от сопла, и сигнал проходит, не встречая сопротивления); если усилие направлено вниз, то, наоборот, замыкается контакт А и размыкается контакт В.

Выпускаются также реле, у которых начальное положение всего мембранного блока фиксируется пружиной (рис. 5.47, в) в одном из крайних положений. Такое реле называют с фиксированным нулем. Для формирования петлеобразной статической характеристики реле охватывают положительной обратной связью путем соединения между собой выводов 2 и 5 и сообщения нижней камеры с атмосферой (рис. 5.48, а, б, в, г).

## 5.8. Динамические характеристики реальных регуляторов, построенных на элементах УСЭППа

Соответствие характеристик реального регулятора идеальным законам регулирования оценивается путем определения границ области нормального режима. Под областью нормального режима подразумевается область, в которой частотные характеристики реального регулятора отличаются от характеристик идеального регулятора не более чем на 7 угловых градусов по фазе и на 10% по амплитуде.

В качестве примера рассмотрим динамические характеристики пропорционального регулятора ПР2.5 и пропорционально-интегрального регулятора ПР3.21.

Как известно из § 5.4, регулятор ПР2.5 реализует зависимость вида

$$p_{\text{вых}} = K_p (p_{\text{и.п}} - p_{\text{зд}}) + p_0. \quad (5.48)$$

Характерной особенностью этого регулятора является наличие в нем усилителя давления с большим коэффициентом усиления, охваченного инерционной отрицательной обратной связью через дроссельный сумматор. Однако при наличии инерционности в усилителе или неоднозначности его статической характеристики (что практически всегда свойственно пневматическим элементам сравнения) подобные структуры склонны к возникновению автоколебаний. Для их подавления вводятся две дополнительные обратные связи с выхода регулято-

ра на вход элемента 3 (см. рис. 5.23): отрицательная единичная (через камеру Г) и инерционная положительная (через дроссель γ и камеру В). В установившихся режимах действие этих связей взаимно компенсируется, но в динамике оно приводит к отклонениям движения регулятора от уравнения (5.48).

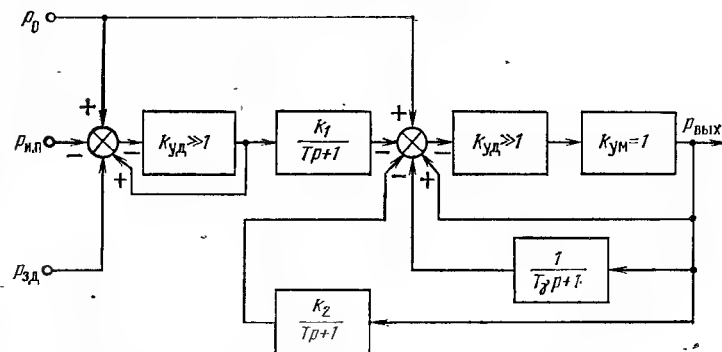


Рис. 5.49. Структурная схема реального П-регулятора.

Структурная схема регулятора, отражающая динамические взаимосвязи между его отдельными элементами, приведена на рис. 5.49. В соответствии со схемой передаточная функция регулятора по каналу входного воздействия имеет вид:

$$W_1(p) = \frac{k_1 (T_1 p + 1)}{T_1 p (T_p p + 1) + k_2 (T_1 p + 1)} = \frac{k_1}{k_2} \frac{T_1 p + 1}{\frac{T T_1}{k_2} p^2 + T_1 \left(1 + \frac{1}{k_2}\right) p + 1}, \quad (5.49)$$

где  $k_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$ ;  $k_2 = \frac{\beta}{\alpha + \beta} = 1 - k_1$ ;  $\frac{k_1}{k_2} = \frac{\alpha}{\beta} = K_p$  — коэффициент

усиления регулятора;  $T = \frac{V}{R\theta(\alpha + \beta)}$  — постоянная времени дроссельного сумматора;  $T_1$  — постоянная времени инерционной положительной обратной связи (дроссель γ — камера В элемента 3).

Если учесть, что

$$\frac{T}{k_2} = \frac{V}{R\theta(\alpha + \beta)} \frac{\alpha + \beta}{\beta} = \frac{V}{R\theta\beta} = T_p, \quad (5.50)$$

где  $T_p$  — постоянная времени апериодического звена «сопротивление β — камера от отрицательной обратной связи», и что

$$1 + \frac{1}{k_2} = 1 + \frac{k_1 + k_2}{k_2} = 2 + K_p, \quad (5.51)$$

то передаточную функцию  $W_1(p)$  можно преобразовать к виду

$$W_1(p) = K_p \frac{T_\gamma p + 1}{T_\gamma T_\beta p^2 + T_\gamma (K_p + 2) p + 1} \quad (5.52)$$

Эта передаточная функция может быть представлена как произведение передаточных функций идеального пропорционального регулятора  $W_n(p)$  и балластного звена  $W_{б1}(p)$ :

$$W_n(p) = K_p; \quad W_{б1}(p) = \frac{T_\gamma p + 1}{T_\gamma T_\beta p^2 + T_\gamma (K_p + 2) p + 1} \quad (5.53)$$

По каналу «контрольная точка  $p_0$  — выход  $p_{вых}$ » по аналогии с вышележащим получим:

$$W_{б2}(p) = \frac{(T_\gamma p + 1)(T_\beta p + 1)}{T_\beta T_\gamma p^2 + T_\gamma (K_p + 2) p + 1} \quad (5.54)$$

Передаточная функция балластного звена представляет собой звено второго порядка. Условием неколебательности такого звена является отсутствие комплексных корней в знаменателе. Аналитически это условие записывается в виде

$$\left(\frac{K_p + 2}{2T_\beta}\right)^2 \geq \frac{1}{T_\beta T_\gamma} \quad (5.55)$$

По передаточной функции  $W_{б}(p)$  можно определить частотные характеристики:

$$A_{б1}(\omega) = \sqrt{\frac{(T_\gamma \omega)^2 + 1}{(1 - T_\gamma T_\beta \omega^2)^2 + [(K_p + 2) T_\gamma \omega]^2}}; \quad (5.56)$$

$$\varphi_{б1}(\omega) = \arctg T_\gamma \omega - \arctg \frac{(K_p + 2) T_\gamma \omega}{1 - T_\gamma T_\beta \omega^2}; \quad (5.57)$$

$$A_{б2}(\omega) = \sqrt{\frac{[(T_\gamma \omega)^2 + 1][(T_\beta \omega)^2 + 1]}{(1 - T_\gamma T_\beta \omega^2)^2 + [(K_p + 2) T_\gamma \omega]^2}}; \quad (5.58)$$

$$\varphi_{б2}(\omega) = \arctg T_\gamma \omega + \arctg T_\beta \omega - \arctg \frac{(K_p + 2) T_\gamma \omega}{1 - T_\gamma T_\beta \omega^2} \quad (5.59)$$

Постоянные времени инерционных звеньев  $T_\beta$  и  $T_\gamma$ , определенные по результатам специальных динамических испытаний, составляют:  $T_\beta = 0,3$  с;  $T_\gamma = 0,08$  с.

Рис. 5.50. Частотная характеристики реальных П- и ПИ-регуляторов.

На рис. 5.50 приведены расчетные и экспериментальные амплитудно-фазовые характеристики регулятора по каналу «рассогласование — выход». Совпадение результатов расчета с экспериментальными данными показывает, что закон движения регулятора соответствует принятому для него уравнению. Граничная частота области нормального режима определяется из условия:

$$|\varphi_{б1}(\omega)| = \left| \arctg T_\gamma \omega - \arctg \frac{(K_p + 2) T_\gamma \omega}{1 - T_\gamma T_\beta \omega^2} \right| \leq 0,123, \quad (5.60)$$

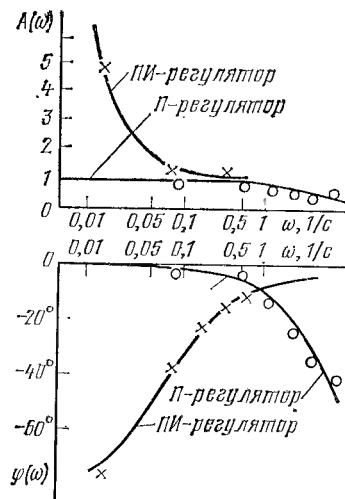
или, используя соотношение  $\arctg x \approx x$  при  $x \leq 0,5$ , получим граничную частоту из выражения

$$|T_\gamma \omega_{гр} - (K_p + 2) T_\gamma \omega_{гр}| = 0,123 \quad \text{или} \quad \omega_{гр} = \frac{1,54}{K_p + 1} \quad (5.61)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что реальный пневматический П-регулятор характеризуется инерционностью, вследствие чего значение выходного сигнала отстает во времени от значения выходного сигнала идеального П-регулятора. При этом П-закон будет соблюдаться лишь при условии, когда инерционность регулятора будет значительно меньше инерционности регулируемого объекта, что необходимо учитывать при проектировании и наладке пневматических систем регулирования.

По аналогии с изложенным на рис. 5.51 приведена структурная схема ПИ-регулятора ПР3.21 с учетом его динамических свойств. Передаточная функция регулятора согласно структурной схеме имеет вид:

$$W(p) = K'_p \frac{T_\gamma p + 1}{T_\beta T_\gamma p^2 + (K'_p + 2) T_\gamma p + 1} + \frac{1}{T_{cp}} \frac{(T_\gamma p + 1)(T_\beta p + 1)}{T_\gamma T_\beta p^2 + (K'_p + 2) T_\gamma p + 1} \quad (5.62)$$



Эту функцию можно представить как произведение передаточной функции идеального ПИ-регулятора и передаточной функции балластного звена:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = K'_p + \frac{T_\beta}{T_c} + \frac{1}{T_c p};$$

$$W_6(p) = \frac{T_\gamma p + 1}{T_\beta T_\gamma p^2 + (K'_p + 2) T_\gamma p + 1} \quad (5.63)$$

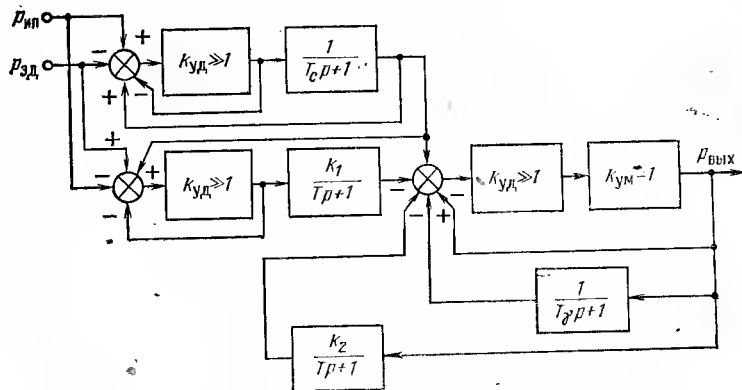


Рис. 5.51. Структурная схема реального ПИ-регулятора.

Между коэффициентами этих уравнений  $K'_p$  и  $T_c$  и параметрами настройки ПИ-регулятора  $K_p$  и  $T_n$  существуют зависимости:

$$K_p = K'_p + \frac{T_\beta}{T_c}; \quad T_n = T_c \left( K'_p + \frac{T_\beta}{T_c} \right). \quad (5.64)$$

Частотные характеристики регулятора могут быть определены расчетным путем по уравнениям:

$$A_{\text{ПИ}}(\omega) = \sqrt{\frac{(T_c K'_p + T_\beta)^2 \omega^2 + 1}{T_c^2 \omega^2}};$$

$$\varphi_{\text{ПИ}}(\omega) = \arctg (T_c K'_p + T_\beta) \omega - \frac{\pi}{2}; \quad (5.65)$$

$$A_6(\omega) = \sqrt{\frac{(T_\gamma \omega)^2 + 1}{(1 - T_\beta T_\gamma \omega^2)^2 + [(K'_p + 2) T_\gamma \omega]^2}};$$

$$\varphi_6(\omega) = \arctg T_\gamma \omega - \arctg \frac{(K'_p + 2) T_\gamma \omega}{1 - T_\beta T_\gamma \omega^2}. \quad (5.66)$$

Расчетные и экспериментальные частотные характеристики, полученные при  $T_c=15$  с,  $K'_p=1,0$ , представ-

лены на рис. 5.50. По аналогии с П-регулятором частотная граница области нормальных режимов определяется из условия (5.61).

Практически, без динамических искажений рассмотренные регуляторы могут работать на малоинерционных промышленных объектах с  $T_{об} \approx 10 \div 20$  с. При малых значениях постоянной интегрирования ( $T_c \leq 20$  с) ПИ-регулятор обладает ограничением по настройке коэффициента усиления  $K'_p > 0,3/T_c$ .

## 5.9. Гидравлические и комбинированные средства регулирования

*Общность принципов построения и специфика пневматических и гидравлических средств регулирования*

Как и в пневмоавтоматике, в гидравлических средствах в качестве источника энергии и сигнала-носителя информации применяется давление рабочей среды. Однако в гидроавтоматике применяются несжимаемые жидкости, в то время как в пневматических средствах используются газообразные рабочие среды. Фактор сжимаемости среды сказывается на передаче информации в длинных линиях, а также при операциях с большими объемами рабочей среды при малой мощности источников. В пневматических средствах преобразования информации объемы рабочих сред и линий связи, как правило, малы и используемые газообразные среды ведут себя в первом приближении как несжимаемые жидкости. Поэтому для построения гидравлических средств преобразования информации можно использовать и аналогичные принципы.

Для большинства типов пневмоэлементов УСЭППА можно построить их гидравлические аналоги (в том числе дроссельные сопротивления и сумматоры, мембранные усилители типа «сопло-заслонка» и мембранные элементы сравнения, и т. п.). Но элемент, эквивалентный пневмоемкости, будет иметь более сложную конструкцию, так как пневмоемкость построена с учетом сжимаемости рабочей среды. Пневмоемкость (см. рис. 5.12, а) аккумулирует среду при повышении давления в постоянном объеме. Масса несжимаемой жидкости в постоянном объеме практически же не зависит от давления. Поэтому для построения элемента, эквивалентного пневмо-

емкости, следует использовать камеру с переменным объемом, зависящим от давления рабочей среды (например, сильфонное устройство вида, показанного на рис. 5.52).

В исполнительной части гидравлических систем автоматизации также можно использовать аналогичные типы исполнительных механизмов. Однако если для пневмоавтоматики типично применение подпружиненного мембранного исполнительного механизма (см. рис. 5.36,а) или функционально аналогичного подпружиненного поршневого исполнительного механизма, то в гидроавтоматике общепромышленного назначения используются преимущ

ественно поршневые исполнительные механизмы со свободным ходом поршня (см. рис. 5.39,в). При несжимаемой рабочей среде такие механизмы способны развивать большую удельную мощность (относительно массы двигателя развиваемая мощность гидравлического исполнительного механизма примерно в десять раз выше, чем у электрического). Введение противодействующих пружин означает снижение полезной удельной мощности и, сверх того, уменьшение диапазона линейности характеристик исполнительного механизма.

Поршневой исполнительный механизм работает по перепаду давления  $\Delta p_z$ . Поэтому для построения систем гидроавтоматики необходимо иметь преобразователи различных типов сигналов-носителей информации в перепад давлений с двуполярной характеристикой (рис. 5.53). Обычно выходной каскад таких преобразователей строится на базе струйного или золотниково

го усилителей-преобразователей. Струйный преобразователь перемещения (а точнее усилия) в перепад давлений (рис. 5.51,а) построен на принципе преобразования кинетической энергии струи жидкости, вытекающей из трубки-сопла, в потенциальную энергию гидростатического давления жидкости при торможении ее в соплах-приемниках. При

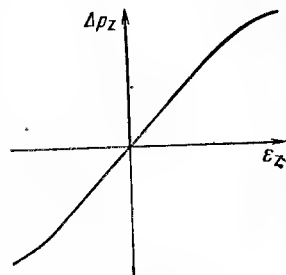


Рис. 5.53. Характеристика струйного преобразователя.

этом гидростатическое давление жидкости в каждом из сопел зависит от угла поворота струйной трубки, а между соплами возникает перепад давлений  $\Delta p_z$ , примерно пропорциональный перемещению управляющего штока.

Такой преобразователь может использоваться также для суммирования двух сигналов ( $\varepsilon$  и  $\zeta$ ) с разными знаками; в этом случае перемещение струйной трубки происходит в результате взаимодействия двух взаимнопротивоположных усилий.

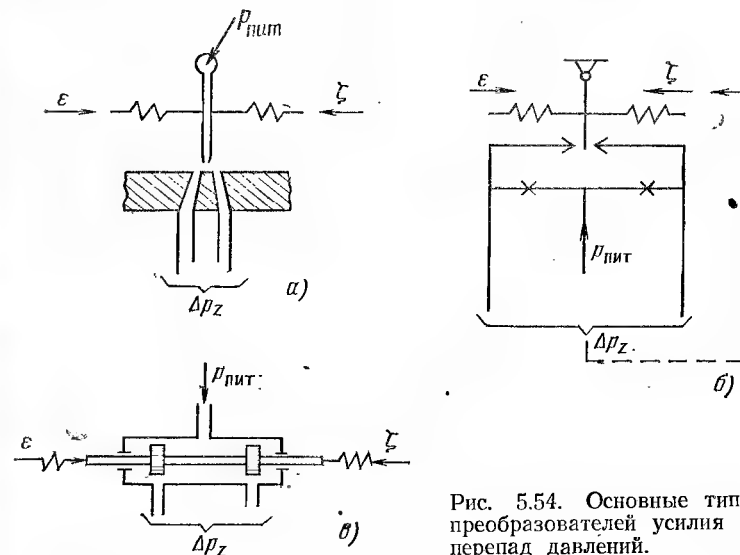


Рис. 5.54. Основные типы преобразователей усилия в перепад давлений.

а — струйный преобразователь; б — преобразователь «сопло-заслонка»; в — золотниковый преобразователь.

Наряду со струйными преобразователями в гидроавтоматике применяются также преобразователи типа «сопло-заслонка» (рис. 5.54,б). Так как преобразователи этого типа имеют нелинейную характеристику, то для построения линейных алгоритмов здесь целесообразно введение функциональных обратных связей.

Струйные преобразователи обладают высокой чувствительностью к малым усилиям, но позволяют получать относительно маломощные сигналы перепада давлений (так как коэффициент полезного действия системы «струйная трубка-сопловая головка» и «сопло-заслонка» невелик). Поэтому в гидроавтоматике широкое применение находят имеющие более мощный выход зо

лотниковые преобразователи (рис. 5.54,в). В таких преобразователях используется эффект резкого изменения сопротивления гидравлических линий при изменении положения золотника. Золотниковый преобразователь может иметь достаточно крутую статическую характеристику, что позволяет использовать его и для релейного управления исполнительным механизмом. В этом случае золотник просто переключает гидравлические линии, т. е. работает как распределитель потоков рабочей среды.

По сравнению со струйной трубкой золотник обладает большей массой, и для его перемещения необходимо развивать большие усилия. Поэтому в гидравлических системах регулирования эти преобразователи часто используются совместно для построения двухкаскадных усилителей (рис. 5.55).

#### Схема реализации линейных алгоритмов регулирования

Гидравлический поршневой исполнительный механизм (см. рис. 1.7,б) имеет характеристики линейного

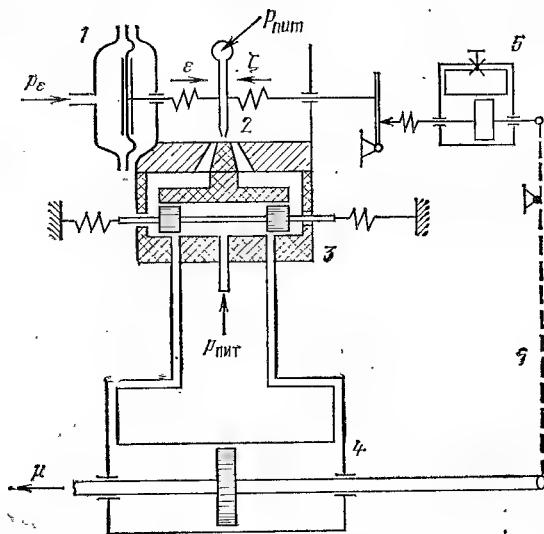


Рис. 5.55. Простейший вариант реализации П-, И-, ПИ-алгоритмов в АСР с поршневым исполнительным механизмом.

1 — преобразователь давления в усилие; 2 — струйный преобразователь; 3 — золотниковый усилитель; 4 — поршневой исполнительный механизм; 5 — обратная связь с динамикой реального дифференцирующего звена; 6 — жесткая обратная связь.

интегрирующего звена, поэтому для построения на его базе И-алгоритма регулирования достаточно дополнительно осуществить лишь линейное преобразование рас- согласование  $\epsilon = u - y$  в достаточно мощный сигнал перепада давлений  $\Delta p_z$ . Эту операцию можно осуществить на преобразователях, представленных на рис. 5.54.

Система регулирования получается простой, если регулируемой величиной является давление, так как в этом случае просто реализуется функция преобразования давления в перемещение струйной трубки, заслонки или золотника. Вариант подобной автоматической системы регулирования давления на базе поршневого исполнительного механизма и двухкаскадного струйно-золотникового усилителя-преобразователя представлен на рис. 5.55 (при отключенной обратной связи).

Однако автоматическая система регулирования с И-алгоритмом, как правило, проигрывает в качестве регулирования (в сравнении с П-, ПИ-, ПИД-алгоритмами). Реализовать последнее можно на базе все той же системы (см. рис. 5.55) путем введения функциональных обратных связей.

Для построения относительно простых (например, одноконтурных, с ПИ-алгоритмом) систем регулирования можно использовать вариант схемы, рассмотренный в гл. 2 (см. рис. 2.8,б). В этом случае требуемый алгоритм регулирования реализуется за счет охвата обратной связью гидравлического исполнительного механизма с передаточной функцией, определяемой соотношением (2.23).

На рис. 5.55 показан такой вариант реализации ПИ-алгоритма регулирования. Гидравлический элемент реализует динамику реального дифференцирующего звена, соответственно вся система в целом реализует ПИ-алгоритм.

Для построения более сложных систем (с автоподстройкой параметров, с переменной структурой и т.п.) такой вариант неприемлем. В этом случае обычно применяется вариант схемы, предложенный в гл. 2 (см. рис. 2.11). В случае охвата исполнительного механизма жесткой обратной связью исполнительная часть регулятора приобретает характеристики П-звена и более сложные алгоритмы регулирования реализуются путем формирования соответствующей управляющей части



АСР, осуществляющей воздействие на перемещение струйной трубки, заслонки или золотника.

Для формирования алгоритмов управляющей части АСР можно использовать систему элементов гидроавтоматики или описанные выше электрические и пневматические системы средств (дополнив последние электрогидравлическим или пневмогидравлическим преобразователями).

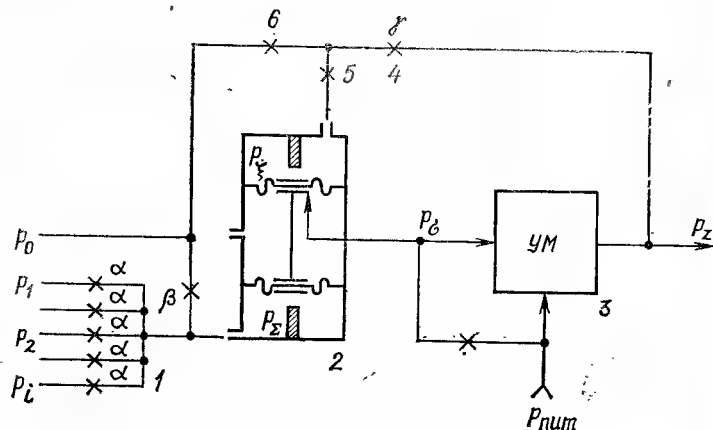


Рис. 5.56. Гидравлический операционный усилитель.

#### Принципы построения системы элементов гидроавтоматики

В основе системы аналоговых элементов автоматики (с любым видом сигнала-носителя информации) лежит операционный усилитель-сумматор. Для электрических средств регулирования третьего поколения такой усилитель строится на интегральной микросхеме, для пневматических элементов УСЭППА таким усилителем является мембранный элемент сравнения. Для системы элементов гидравлической регулирующей автоматики операционный усилитель строится по схеме рис. 5.56.

Функционально усилитель состоит из дроссельного сумматора 1, мембранного элемента сравнения 2 и усилителя мощности 3, охваченного отрицательной обратной связью 4. Дроссельный сумматор 1 реализует операцию алгебраического суммирования входных давлений  $p_1, p_2, \dots, p_i$  и опорного давления  $p_0$ . При этом давление в нижней камере мембранного элемента определяется соотношением

$$\Delta p_x = p_x - p_0 = A[(p_1 - p_0) + (p_2 - p_0) + \dots + (p_i - p_0)], \quad (5.67)$$

где  $A$  зависит от проводимостей  $\alpha$  и  $\beta$  дросселей на линиях входного и опорного давлений.

Перемещение мембранного блока под действием давления  $p_x$  вызывает изменение гидравлического сопротивления пары «сопло-заслонка» (верхняя мембрана) и изменение давления  $p_2$ . Это дав-

ление воспринимается усилителем 3, охваченным отрицательной обратной связью 4. Так как условием равновесия мембранного блока является равенство давлений в верхней и нижней камерах мембранного элемента

$$p_x = p_z = k_c p_z, \quad (5.68)$$

то давление на выходе усилителя 3 будет:

$$p_z = \frac{1}{k_c} p_x, \quad (5.69)$$

где  $k_c$  — коэффициент обратной связи, значение которого определяется проводимостью дросселей 5, 6 в линии обратной связи.

Комбинацией в линиях дроссельного сумматора и обратной связи операционного усилителя гидравлических сопротивлений и емкостей можно реализовать различные линейные алгоритмы регулирования, а возможность суммирования на дроссельном сумматоре более чем двух входных давлений позволяет строить сложные схемы регулирования с использованием информации из дополнительных источников.

Простые схемы реализации линейных алгоритмов регулирования получаются при использовании гидравлической дифференцирующей емкости вида, аналогичного на рис. 5.52.

Пусть входная полость связана с магистралью большой мощности (и давление  $p_1$  не зависит от процессов в емкости), а выходная полость связана с некоторым приемником информации и через дроссель — со второй магистралью большой мощности с постоянным давлением  $p_0$ . В этом случае давление  $p_2$  связано с входным давлением  $p_1$  практически уравнением дифференцирующего звена

$$p_2 = T p_1', \quad (5.70)$$

причем постоянная  $T$  определяется площадью мембраны, жесткостью пружины и гидравлическим сопротивлением дросселя. Включение такой емкости в обратную связь 4 операционного усилителя (рис. 5.56) вместо дросселя  $\gamma$  позволяет реализовать интегрирующее звено, а включение емкости вместо дроссельного сумматора 1 — дифференцирующее звено. Все это в целом позволяет реализовать широкий спектр линейных алгоритмов регулирования.

Описанный выше состав элементов гидроавтоматики может быть дополнен релейными элементами. Простейший релейный мембранный элемент (рис. 5.57, а) может быть построен аналогично подобному же элементу пневмоавтоматики (см. рис. 5.48). Такой элемент реализует релейную характеристику вида рис. 5.57, б. Различные варианты соединения входов-выходов мембранного реле позволяют реализовать широкий спектр логических операторов (в том числе операции отрицания «НЕ», конъюнкции «И», дизъюнкции «ИЛИ» и т. п.).

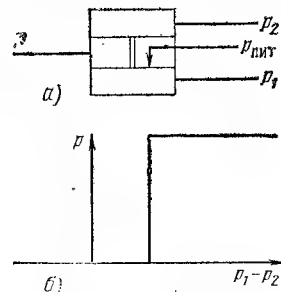


Рис. 5.57. Простейший гидравлический элемент (а) с релейной характеристикой (б).

В автоматических системах регулирования общепромышленного назначения (и в том числе в теплоэнергетике) часто применяется комбинированный вариант регулятора. В этом случае в исполнительной части АСР используется гидравлический исполнительный механизм, а управляющая часть реализуется на серийных электрических (или иногда на пневматических) средствах. Необходимым элементом такого регулятора является электрогидропреобразователь или пневмогидропреобразователь.

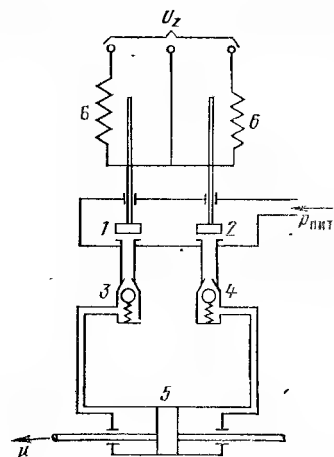


Рис. 5.58. Схема электрогидравлического преобразователя с релейной характеристикой.

1, 2 — электромагнитные клапаны; 3, 4 — шариковые клапаны; 5 — поршневой исполнительный механизм; 6 — обмотки электромагнита.

Вариант электрогидравлического преобразователя с релейной характеристикой приведен на рис. 5.58. Если сигнал  $U_z$  на входе преобразователя отсутствует, то обмотки электромагнитов 6 обесточены и клапаны 1, 2 (находящиеся под давлением рабочей среды  $p_{пит}$ ), находятся в нижнем положении. В этом случае перепад давлений на поршне 5 исполнительного механизма равен нулю, а его неконтролируемые перемещения под действием внешней нагрузки (со стороны регулирующего органа) блокируются шариковыми обратными клапанами 3, 4. При подаче управляющего сигнала  $U_z$  на одну из обмоток электромагнитов соединенный с его стержнем клапан переместится и соединит соответ-

ствующую полость исполнительного механизма с линией питания. Тогда под действием возникшего перепада давлений (противоположная полость соединяется с линией слива) поршень начнет перемещаться.

При реализации комбинированного регулятора по схемам, рассмотренным в гл. 2 (рис. 2.8, б, 2.12), можно использовать более простой преобразователь с релейной характеристикой вида, показанного на рис. 2.13. Соответственно здесь будем иметь релейное управление гидравлическим исполнительным механизмом, который приобретает в этом случае динамические свойства исполнительного механизма постоянной скорости.

Глава шестая

## УПРАВЛЯЮЩИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АСУ ТП

### 6.1. Назначение и структура управляющих вычислительных комплексов

При использовании вычислительных машин для контроля и управления технологическими процессами на обработку вводимых данных и выдачу результата накладываются жесткие ограничения, диктуемые темпом развития процессов в контролируемом или управляемом объекте. Говорят, что такие машины работают в реальном масштабе времени, т. е. обрабатывают поступающую информацию с объекта настолько быстро, что результат обработки удается использовать для управляющего воздействия. Вычислительные машины, включаемые тем или иным способом в контур управления, называются управляющими вычислительными комплексами (УВК).

При разработке современных комплексов широко используется принцип агрегатирования, в соответствии с которым комплексы компонуются из набора автономных функциональных модулей и блоков с унифицированными сопряжениями, выполняющих определенные функции по обработке или хранению информации, преобразованию сигналов, выводу информации и т. п.

Набор блоков и модулей получил название агрегатной системы средств вычислительной техники (АСВТ). Такой принцип построения позволяет получать из имеющихся устройств управляющие вычислительные комплексы специальных конфигураций, приспособленные к объектам с различной технологией. Все модули выполняются совместимыми по характеристикам информационных и управляющих сигналов, по конструкциям элементов и узлов, а также по организации обмена информацией между ними в различных режимах работы.

Обобщенная схема УВК, построенного по агрегатному принципу, приведена на рис. 6.1.

Основным звеном обработки информации и центральным управляющим органом комплекса является процессор (Пр).

Процессор выполняет команды программы и организует обращение к оперативному запоминающему устройству (ОЗУ), которое служит для хранения информации, непосредственно используемой в процессе вычислений. Оперативные запоминающие устройства в современных УВК строятся на ферритовых сердечниках. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) в рабочем режиме процессора допускают лишь считывание хранимой информации. Занесение информации в ПЗУ производится обычно в процессе его изготовления. В зависимости

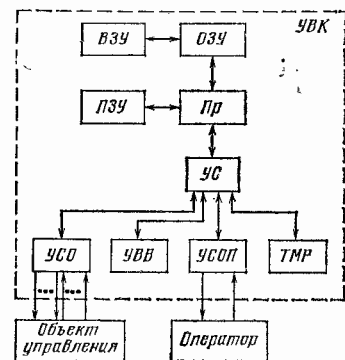


Рис. 6.1. Структурная схема управляющего вычислительного комплекса.

от типа запоминающих элементов различают трансформаторные и полупроводниковые интегральные ПЗУ.

Оперативная память часто оказывается недостаточной для хранения всех необходимых данных. В этом случае к процессору (как правило, через ОЗУ) подключаются внешние запоминающие устройства (ВЗУ) в виде накопителей на магнитной ленте (НМЛ) и на магнитных дисках (НМД).

Связь управляющего вычислительного комплекса с измерительными преобразователями и исполнительными механизмами осуществляется с помощью устройств связи с объектом (УСО).

Информация с внешних носителей (перфолент, перфокарт, печатающих устройств) вводится и выводится с помощью устройств ввода-вывода (УВВ). Устройства связи с оперативным персоналом (УСОП) обеспечивают связь комплекса с оператором-технологом. Для обеспечения работы в реальном масштабе времени УВК оснащаются устройством счета реального времени — таймером (ТМР).

Все устройства, кроме процессора и памяти, называются внешними периферийными устройствами. Обмен информацией между процессором и внешними устройствами обеспечивается с помощью

устройств сопряжения (УС). Наиболее распространенным является стандартное сопряжение 2К, унифицированное в АСВТ.

Сопряжение 2К снабжено шинами передачи информации и управляющих сигналов к внешнему устройству и шинами приема информации и сигналов от устройства (24 шины передачи информации к устройству и 24 — от устройства). Передача информации осуществляется 16-разрядными словами, для чего выделяются 32 шины (по 16 в каждом направлении). Четыре шины отводятся для контроля передаваемой информации. Остальные шины служат для передачи команд к устройству и приема от него сигналов состояния. Сами внешние устройства подключаются с помощью интерфейсной карты, которая содержит схему управления данным устройством и вставляется в разъемы унифицированного сопряжения.

Наиболее характерными способами обмена с внешними устройствами являются программный обмен информацией и внепрограммный обмен.

Программный обмен с прерыванием вычислений применяется для приема и выдачи информации внешним устройством с малым временем ожидания и для взаимодействия УВК с аппаратурой отображения, регистрации и передачи данных, а также для связи с пультами операторов. Обмен без прерывания используется в тех случаях, когда внешнее устройство имеет достаточно большое допустимое время ожидания и некоторая задержка выполнения операций обмена не приводит к искажениям или потере информации.

Внепрограммный обмен информацией может осуществляться в тех случаях, когда внешние устройства УВК имеют непосредственный (прямой) доступ к оперативной памяти. Управление непосредственным обменом информации осуществляется через канал прямого доступа. В этих случаях в ОЗУ предусматривается приоритетная схема, которая блокирует одновременное обращение различных устройств к одним и тем же ячейкам памяти.

В составе управляющих вычислительных комплексов АСВТ имеется канал прямого доступа в память (КПДП), быстроедействие которого намного больше быстрогодействия обычных каналов. Наличие КПДП позволяет, когда это необходимо, выполнять операции ввода-вывода без прерывания работы процессора при помощи непосредственного взаимодействия с оперативной памятью. Через КПДП можно подключить устройства внешней памяти на магнитных дисках, на магнитной ленте, устройства быстрой печати и др.

Все функции управляющих вычислительных комплексов в АСУ ТП независимо от особенностей объекта управления можно разделить на информационные и управляющие.

К информационным функциям относятся циклический опрос параметров и их первичная обработка (линеаризация, масштабирование и др.), избирательный контроль, сигнализация отклонений технологических параметров, регистрация срабатывания защит, цифровая регистрация результатов, расчет и анализ обобщенных технико-экономических показателей (ТЭП),

диагностика состояния основного оборудования и средств АСУ ТП.

К управляющим функциям относятся оптимизация хода технологического процесса, автоматизированные пуски и остановки технологического оборудования, непосредственное цифровое регулирование, а также обеспечение связи с вышестоящими иерархическими уровнями АСУ.

Для быстрого реагирования на сигналы различных устройств управляющие вычислительные комплексы имеют средства для прерывания выполняемой (текущей) программы, перехода к программе обслуживания этих устройств и возвращения к прерванной программе. При работе УВК формируются сигналы прерываний различного характера:

прерывания от внешних устройств (таймера, кнопки запроса на пульте), в том числе и от объекта управления, формируются в тех случаях, когда канал или внешнее устройство не могут начать операцию ввода-вывода или в момент окончания ввода-вывода;

прерывания по программе происходят в тех случаях, когда они заранее предусмотрены программистом или когда требуется немедленный переход к другой программе. Эти прерывания формируются также при нарушении порядка выполнения операций или команд, защиты памяти, переполнении разрядной сетки и т. п.;

прерывания от схем контроля УВК происходят в случае обнаружения ошибки в работе системы.

Каждой причине прерывания ставится в соответствие значение приоритета 1, 2, 3... Приоритет 1 присваивается причине, которая принимается процессором в первую очередь, и т. д.

Прерывание по отдельным причинам может быть запрещено аппаратным способом (с помощью определенной кнопки на пульте управления) или программным способом.

## 6.2. Структура программного обеспечения управляющих вычислительных комплексов

Управляющие вычислительные комплексы, как и универсальные ЭВМ, работают по принципу программного управления вычислительным процессом. Все основные приемы и методы составления программ, исполь-

зуемые в технике программирования для универсальных ЭВМ, применимы и для УВК. Различия заключаются лишь в методике подготовки программ и их реализации на машинах.

Программирование задач для УВК имеет следующие особенности:

необходимость реализации алгоритмов контроля и управления в реальном масштабе времени, т. е. преобразование входной информации в искомый результат должно быть выполнено в строго фиксированные, ограниченные сроки;

обеспечение стабильности программ в течение достаточно большого промежутка времени;

большое разнообразие решаемых задач, связанных между собой общими переменными;

необходимость обмена информацией с достаточно большим числом внешних устройств, состав и тип которых зависят от конкретной системы управления;

повышенные требования к различного рода сбоям и ошибкам.

При рассмотрении программного обеспечения УВК надо исходить из назначения АСУ ТП как системы человек — машина, обеспечивающей автоматизированный сбор и обработку информации и управление технологическим процессом. С этой точки зрения целесообразно рассмотреть содержание терминов «математическое обеспечение АСУ» и «программное обеспечение АСУ». Совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач управления и обработки информации с применением вычислительной техники принято называть математическим обеспечением (МО), а совокупность программ для реализации этих задач и обеспечения функционирования всех устройств УВК называют программным обеспечением (ПО).

Программное обеспечение разделяют на специальное и общее.

Специальное программное обеспечение разрабатывается пользователями машины при создании конкретной системы.

Общее программное обеспечение представляет собой совокупность программ, предназначенных для автоматизации подготовки программ, организации и контроля

вычислительного процесса в УВК при его работе в системе управления.

Практика разработки АСУ ТП различных объектов показала, что специальное программное обеспечение в свою очередь также целесообразно разделить на две группы: программное обеспечение функционирования управляющего вычислительного комплекса и технологическое программное обеспечение.

Выделение из специального программного обеспечения программ функционирования связано с тем, что современные агрегатированные средства вычислительной техники позволяют создавать разнообразные, в том числе многопроцессорные и многомашинные информационные или управляющие вычислительные комплексы, используя в них средства различных изготовителей. Поставщик в таких случаях не может предусмотреть всех возможных конфигураций УВК и разработать полное программное обеспечение. Технологическое же программное обеспечение непосредственно привязывается к объекту и учитывает все его особенности, в частности, оно должно изменяться при изменении технологической схемы объекта, исключении или добавлении новых точек замеров и т. п.

Общее программное обеспечение обычно называют системой программного обеспечения (СПО), которая разрабатывается и поставляется совместно с комплексом технических средств заводом-изготовителем.

Система программного обеспечения представляет совокупность программных средств, предназначенных для эффективного применения управляющего вычислительного комплекса, облегчения использования его для разнообразных целей, уменьшения трудоемкости эксплуатации, автоматизации процесса подготовки программ (автоматизации программирования), упрощения связи комплекса с оператором и объектом при решении задач автоматизированного управления.

В системе программного обеспечения (рис. 6.2) можно выделить систему подготовки программ и систему организации вычислений.

Система подготовки программ предназначена для обеспечения наиболее трудоемкого процесса при решении задач управления и включает в себя систему автоматизации программирования и систему отладки программ. Система автоматизации программирования в своем составе имеет загрузчики, трансляторы, интерпретаторы. Система отладки программ содержит редак-

тирующие, компоновочные и отладочные программы, а также программы переписи с носителя на носитель и пр.

Система организации вычислений предназначена для автоматизации процесса работы управляющего вычислительного комплекса в различных режимах и позволяет организовать взаимодействие различных устройств в процессе решения функциональных задач.

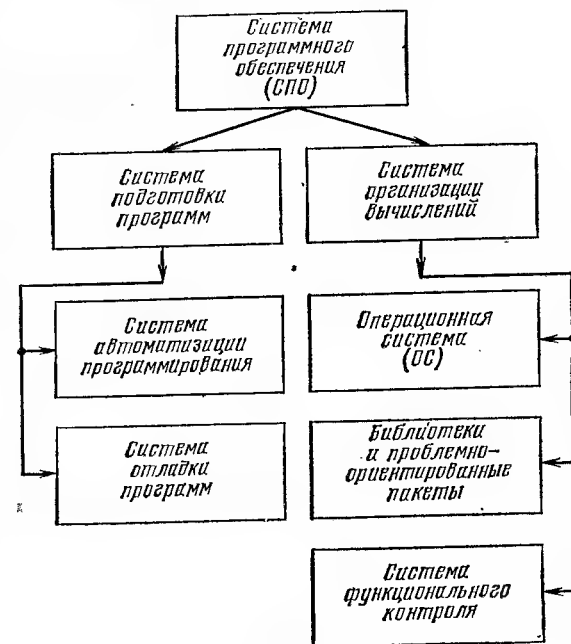


Рис. 6.2. Структура системы программного обеспечения УВК.

Основу системы организации вычислений составляет операционная система (ОС). Операционные системы современных управляющих вычислительных комплексов, также как и универсальных ЭВМ, являются машинно-ориентированными системами, т. е. каждый тип УВК имеет свою операционную систему. Несмотря на машинную ориентацию, любая операционная система оперирует с одними и теми же группами объектов.

К первой группе относятся программы, находящиеся в различных состояниях (ожидания, счета, выполнения, неисправности и т. п.). Во вторую группу входят ресурсы оборудования (память, каналы сопряжения, устройства ввода-вывода, внешние устройства), также находящиеся в различных состояниях. В третью группу входят массивы данных и, наконец, четвертую группу составляет персонал, обслуживающий и использующий УВК для решения своих задач.

Каждое из управлений перечисленными группами имеет свои цели. Действие операционной системы заключается в том, чтобы согласно логике, обеспечивающей достижение цели управления, изменить состояние объектов названных групп и перераспределить имеющиеся в машине ресурсы. Группы в свою очередь воздействуют на операционную систему посредством выдачи запросов и сигналов о своем состоянии.

Так, например, операционная система современного управляющего вычислительного комплекса может включать в свой состав основную управляющую систему (ОУС), обеспечивающую однозадачный режим работы, супервизор реального времени, позволяющий выполнять несколько десятков задач реального времени без прерываний одной задачи другой; дисковую операционную систему реального времени (ДОС РВ), обеспечивающую одновременную работу УВК в многозадачном режиме в реальном масштабе времени с использованием накопителей на дисках; интерпретирующую систему, предназначенную для решения математических и инженерных задач на диалоговом языке высокого уровня и др.

Для сокращения трудозатрат при программировании задач в состав системы организации вычислений могут включаться библиотеки (например, библиотека стандартных подпрограмм, включающая в себя программы вычисления элементарных функций; библиотека программ численного анализа; библиотека программ обработки статистической информации и др.) и проблемно-ориентированные пакеты, позволяющие без предварительного программирования компоновать системы сбора, анализа и обработки технологической информации, а также решать ряд других функциональных задач АСУ ТП.

На систему организации вычислений возлагается также выполнение задач контроля и проверки работоспособности как отдельных устройств, так и всего комплекса в целом. Программы, обеспечивающие выполнение задач контроля, образуют систему функционального контроля.

Средства программного обеспечения следует рассматривать как вид промышленной продукции, такой же как и сами управляющие вычислительные комплексы\*. В соответствии с этим должны применяться индустриальные методы при разработке, испытаниях, проверке и размножении средств программного обеспечения.

### 6.3. Подготовка задач АСУ ТП для реализации в управляющих вычислительных комплексах

Подготовка задач производится в несколько этапов: математическая формализация задачи, при которой словесное задание записывается последовательностью формул;

\* В зарубежной литературе терминам «аппаратные средства» и «средства программного обеспечения» соответствуют термины «hardware» и «software», что буквально означает «жесткий товар» и «мягкий товар».

алгоритмизация, или разработка численного алгоритма решения задачи;  
программирование задачи;  
редактирование и отладка программы.

Одним из основных этапов является разработка алгоритма. Под алгоритмом понимают точное предписание по преобразованию исходных данных с целью получения результата решения задачи. Существует несколько способов записи алгоритма.

Графическое представление (в виде блок-схемы) алгоритма — этапы решения задачи изображаются геометрическими фигурами (рис. 6.3). Соединительные линии между фигурами указывают последовательность выполнения операций. Внутри фигуры (блока)

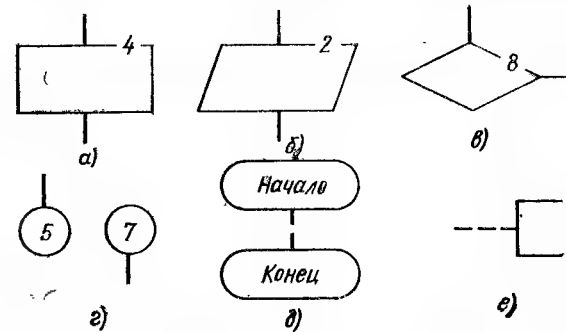


Рис. 6.3. Условное обозначение блоков в блок-схемах алгоритмов.

а — вычислительный блок; б — блок подготовки; в — логический блок; г — блок соединения; д — блок начала и конца; е — комментарий.

дается формульное или словесное описание соответствующей операции. В общем случае можно выделить следующие группы блоков:

вычислительный блок, под которым понимают участок алгоритма, связанный с непосредственным вычислением функций или выполнением арифметических операций (рис. 6.3,а). Блоки могут нумероваться, что даст возможность указывать передачи управления или описывать содержание блоков;

блок подготовки предназначен для указания действий по вводу-выводу данных, преадресации и т. д. (рис. 6.3,б);

логический блок — участок алгоритма, связанный с изменением направления вычислений. Характерной особенностью логических блоков является передача управления в зависимости от признака, вырабатываемого блоком (рис. 6.3,в). Как правило, после логического оператора алгоритм разветвляется. Внутри блока записываются условия передачи управления, а стрелки показывают направление передачи управления;

блоки операций соединения (рис. 6.3,г) обозначают, какому блоку передается или от какого блока принимается





Продолжение табл. 6.1

| Наименование                           | Модель машины ЕС ЭВМ |          |          |           |
|----------------------------------------|----------------------|----------|----------|-----------|
|                                        | ЕС-1033              | ЕС-1040  | ЕС-1050  | ЕС-1065   |
| Производительность,<br>тыс. операций/с | 200                  | 320      | 500      | 4500      |
| Емкость ОЗУ, Кбайт                     | 256—512              | 256—1024 | 256—1024 | до 16 324 |
| Страна-изготовитель                    | СССР                 | ГДР      | СССР     | СССР      |

ботка больших интегральных схем с более высоким уровнем интеграции привела к созданию микро-ЭВМ, находящихся все более широкое применение в различных задачах автоматизации.

Единая система машин ЕС ЭВМ по составу периферийного оборудования и элементной базе относится к вычислительным машинам третьего поколения. Машины ЕС ЭВМ находят большое применение на уровнях более высокого ранга многоступенчатых АСУ предприятиями, объединениями, отраслями и т. д. На базе ЕС ЭВМ создаются также системы, предназначенные для решения разнообразных научно-технических задач, реализации измерительно-информационных систем для сбора и обработки большого количества данных и др.

В состав ЕС ЭВМ входит ряд машин различной мощности и производительности с быстродействием от 10 тыс. до 4,5 млн. операций в секунду, с объемом оперативной памяти от 8 до 16 324 Кбайт.

Основные технические характеристики некоторых моделей ЕС ЭВМ приведены в табл. 6.1. Машины системы ЕС ЭВМ достаточно полно описаны в соответствующей технической литературе.

Управляющие вычислительные комплексы агрегатной системы первоначально строились на дискретных полупроводниковых элементах АСВТ-Д. Дальнейшее развитие и совершенствование АСВТ-Д привело к созданию агрегатной системы средств вычислительной техники на микромодульной основе АСВТ-М.

Структура комплексов АСВТ-М представляет собой набор агрегатных устройств с унифицированными внешними связями, из которых можно компоновать различные УВК с заданными параметрами, начиная от про-

стейших систем сбора информации до сложных многопроцессорных управляющих систем.

Основной номенклатурной единицей технических средств АСВТ-М является агрегатный модуль.

Агрегатный модуль — это изделие, которое имеет унифицированные внешние связи, выполняет какие-либо функции по обработке или хранению информации, коммутации передач, преобразованию физических сигналов и т. п. и является элементарной единицей при компоновке управляющего комплекса проектным путем.

В состав АСВТ-М входят информационные комплексы М-40, М-60; управляющие вычислительные комплексы М-6000, М-7000, М-400 и ЭВМ М-4030, применяющаяся в качестве верхнего звена иерархических АСУ ТП.

Технические средства АСВТ-М дают возможность создавать АСУ различной сложности: от централизованных систем контроля отдельных агрегатов и установок до сложных АСУ крупными предприятиями и комбинатами.

Для использования технических средств АСВТ-М в составе АСУ ТП рекомендуется применять:

на уровне технологических установок и агрегатов — информационные комплексы М-40 и М-60;

на уровне технологических процессов или сложных объектов — однопроцессорные УВК, в первую очередь комплексы М-6000, М-7000. При этом реализуются системы группового программного и прямого цифрового управления, в ряде случаев с оптимизацией параметров;

на уровне производств и цехов — многопроцессорные комплексы М-6000, М-7000, М-400. Здесь к задачам оптимального управления добавляются технико-экономические и диспетчерские задачи и усложняются сами алгоритмы управления;

на уровне предприятий по классам задач реального времени — вычислительные комплексы М-4030, связанные с объектом управления через УВК низших уровней (комплексы М-40, М-400, М-6000).

Ниже рассматриваются основные характеристики перечисленных комплексов.

**Информационный комплекс М-40** предназначен для решения задач контроля и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности, в том числе и в теплоэнергетике. В многоуровневых си-



стемах М-40 используются в качестве низовой подсистемы, осуществляющей сбор и первичную обработку информации с датчиков на объекте (см. рис. 6.10) и работающей в реальном масштабе времени, осуществляя непосредственный обмен с комплексами более высокого класса (М-6000, М-7000, М-400, М-4030).

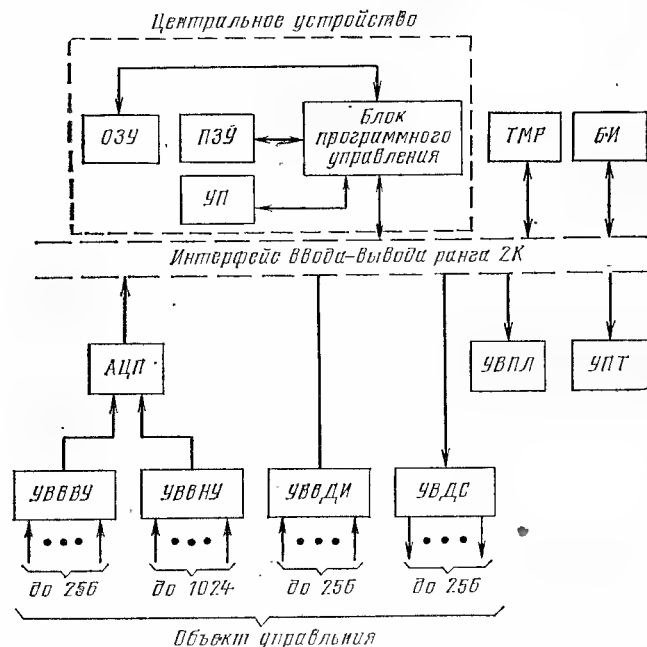


Рис. 6.4. Структурная схема информационного комплекса М-40.

Структурная схема комплекса М-40 представлена на рис. 6.4. Центральное устройство представляет собой одноадресную вычислительную машину и имеет в своем составе блок программного управления, пульт управления (УП), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) емкостью 8 Кбайт для хранения микропрограмм и команд и оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) для хранения оперативной информации, емкость которого может наращиваться до 16 Кбайт.

Центральное устройство построено по принципу микропрограммного управления (управляющий автомат с хранимой в памяти программируемой логикой), что облегчает разработку различных модификаций путем изменения микропрограммы. Система микропрограмм позволяет реализовать практически любые алгоритмы централизованного контроля. Максимальная скорость выполнения микрокоманд составляет 500 000 операций в секунду.

Подключение устройств ввода-вывода к центральному устройству осуществляется с помощью интерфейсных карт через унифицированное сопряжение ранга 2К. Центральное устройство комплекса М-40 имеет 16 выходов на сопряжение 2К.

Аналоговые сигналы через устройство ввода высокого уровня (УВВВУ) и устройство ввода низкого уровня (УВВНУ), преобразованные в постоянное напряжение 0—5 В, поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где преобразуются в эквивалентный двоичный код и поступают для соответствующей обработки в центральное устройство. Максимальное число аналоговых сигналов до 512.

Термоэлектрические преобразователи подключаются к УВВНУ через специальные блоки компенсации температуры холодных спаев.

Информация от двухпозиционных датчиков (контакты реле и клавиши, тумблеры, переключатели, логические элементы — всего до 1400 сигналов дискретной информации) вводятся с помощью устройств ввода дискретной информации (УВВДИ), реализуемых на базе стандартных модулей АСВТ-М. Скорость опроса составляет 1500 сигналов в секунду.

Устройство вывода двухпозиционных сигналов (УВДС) осуществляет управление контактными и бесконтактными исполнительными устройствами и выдает информацию на мнемосхемы и сигнальные табло.

Кроме перечисленных устройств в комплекс М-40 входит:

устройство вывода на перфоленду (УВПЛ) на базе ленточного перфоратора ПЛ-150, предназначенное для вывода неоперативной информации;

устройство печати технологической информации (УПТ) для печати оперативной технологической информации (с помощью автоматической печатающей машинки АПМ-3М со скоростью 10 знаков/с), а также выносной блок индикации (БИ), предназначенный для дистанционного вызова на индикацию цифровой информации.

В число задач комплекса М-40 входит:

сбор информации с аналоговых датчиков в диапазоне сигналов 0—20; 0—50; 0—100 мВ; 0—5 В; 0—5 мА; автоматическая компенсация температуры холодных спаев термоэлектрических преобразователей;

преобразование аналоговых сигналов в цифровой код;

линеаризация и масштабирование;

сравнение параметров с уставками;

вывод информации на цифровые индикаторы;

регистрация параметров по вызову оператора;

выдача двухпозиционных сигналов на исполнительные механизмы;

прием сигналов с двухпозиционных датчиков;

запись информации на перфоленду.

Разработаны три модификации комплексов: М-40, М-40-43/2 и М-40-43/3, отличающиеся друг от друга составом внешних устройств и программным обеспечением. Первая модификация предназначена для контро-

для и управления непрерывными технологическими процессами в производствах с преобладанием аналоговых входных сигналов. Модификация М-40-43/2 нашла применение в энергетике, а модификация М-40-43/3 — в дискретных производствах, преимущественно в машиностроении для контроля и управления конвейерами.

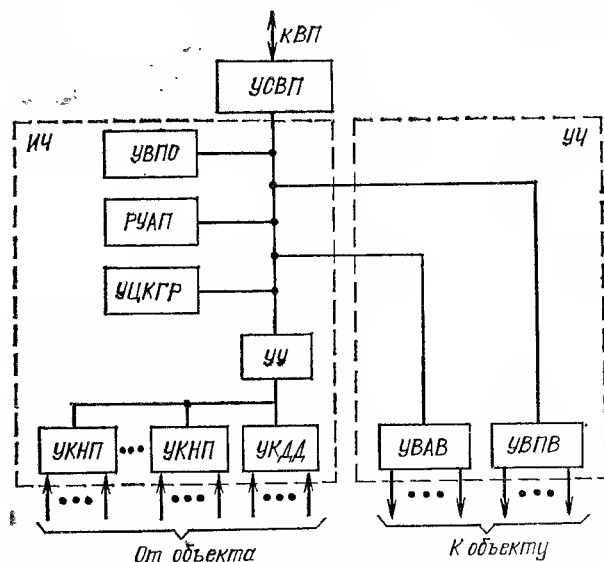


Рис. 6.5. Структурная схема информационного комплекса М-60.

Система программного обеспечения состоит из операционной системы, обеспечивающей работу комплекса в реальном масштабе времени, библиотек стандартных программ, тестов, позволяющих проверить работоспособность системы, и специальных программ, обеспечивающих ввод и вывод сигналов, вызов информации на индикацию, сравнение с уставками, линеаризацию и масштабирование и т. п. Описание программ выполняется на мнемокоде.

**Информационный комплекс М-60** разработан для применения в АСУ ТП мощными энергоблоками ТЭС и АЭС, которые характеризуются большим объемом и разнообразием входной информации. Комплекс М-60 может применяться как в автономном режиме в качестве беспроцессорной системы сбора, регистрации и первичной обработки информации, так и в качестве

низшей иерархической ступени, работающей с комплексами типа М-6000 или М-7000.

Структурная схема комплекса М-60 приведена на рис. 6.5 и состоит из двух частей: информационной (ИЧ) и управляющей (УЧ).

В информационной части осуществляется:

сбор и обработка информации, поступающей от датчиков технологических параметров с общим количеством до 4096;

сигнализация об отклонениях параметров от нормы (до 512 параметров);

контроль по вызову оператора на аналоговых и цифровых приборах (соответственно до 384 и 120 параметров одновременно);

регистрация и алфавитно-цифровая печать параметров;

контроль и регистрация результатов расчетов, полученных из УВК по вызову оператора.

Управляющая часть осуществляет воздействие на исполнительные органы объекта по сигналам, поступающим из УВК и от оператора через пульт управления комплексом.

В состав информационной части входят:

устройство коммутации, нормализации и преобразования (УКНП), предназначенное для усиления сигналов низкого уровня, преобразования в двоичный код аналоговых сигналов от различных измерительных преобразователей (термоэлектрические термометры градуировок ХА, ХК и ГП-1, термометры сопротивления всех градуировок, потенциометрические преобразователи), к каждому УКНП подключаются до 60 сигналов;

устройство коммутации дискретных датчиков (УКДД), позволяющее подключить до 256 8-разрядных кодовых датчиков или 2048 двухпозиционных;

устройство управления (УУ), осуществляющее управление блоками сигнализации, контроля, регистрации и передачи информации в УВК от УКНП и УКДД;

устройство цифрового контроля и графической регистрации (УЦКГР), производящее контроль любого подключенного параметра, а также расчетных величин с помощью клавишного вызывного поля на восьми приборах цифровой или графической регистрации (цифровые приборы ДТ-2М, графические регистраторы КСП-2);

региструющее устройство с адресозадающим принципом печати (РУАП), позволяющее одновременно регистрировать значения 24 произвольно выбранных параметров (на бланке печатаются адрес, значения параметров и время);

устройство выработки параметров отклонений (УВПО), производящее сравнение текущих значений параметров объекта с уставками, вырабатывающее признаки отклонения от уставок, запоминающее и выдающее в УВК сигналы «Больше», «Меньше» и «Ошибка», а также световую и звуковую технологическую сигнализацию фактов отклонения на устройства технологической сигнализации.

В состав управляющей части входит:

устройство выработки аналоговых воздействий (УЗАВ) по командам УВК или с пульта оператора, которое производит корректировку заданий локальным автоматическим регулятором;

устройство выработки позиционных воздействий (УВПВ), производящее многоканальное адресное преобразование двоичного кода в двухпозиционный — бесконтактный релейный или время-импульсный сигнал для воздействия на исполнительные органы объекта

(в одном конструктиве 1024 время-импульсных и 64 двухпозиционных сигналов).

Информационный комплекс выполняет следующие функции:

- опрос датчиков с аналоговым входным сигналом, нормализацию, усиление и преобразование их в двоичный код, передаваемый в вычислительный комплекс;

- опрос датчиков с дискретным выходным сигналом и передачу информации от них в виде двоичного кода в вычислительный комплекс;

- контроль параметров по вызову оператора на аналоговых и цифровых приборах;

- регистрацию параметров по вызову оператора на графических и алфавитно-цифровых печатающих устройствах;

- световую и звуковую сигнализацию отклонений параметров путем сравнения с уставками, хранящимися в информационном комплексе, или по сигналам, передаваемым из вычислительного комплекса;

- передачу в вычислительный комплекс данных об отклонениях параметров от нормы с указанием адреса параметра и знака отклонения;

- корректировку заданий регуляторам и позиционное воздействие на регулирующие органы.

Подсоединение информационного комплекса М-60 к управляющему осуществляется с помощью устройства сопряжения с вычислительным комплексом (УСВК).

**Управляющие вычислительные комплексы М-6000** komponуются в виде типовых комплексов из набора агрегатных модулей АСВТ-М. По функциональному назначению модули объединяются в следующие группы устройств:

- устройства для построения вычислительного комплекса (процессор — Пр, оперативное запоминающее устройство — ОЗУ, расширитель арифметический — РА, расширитель ввода-вывода — РВВ, устройство наращивания памяти — УНП, канал прямого доступа к памяти — КПДП, канал межпроцессорной связи — КМС);

- устройства ввода-вывода и внешней памяти (устройство ввода с перфоленты — УВВПЛ, устройство вывода на перфоленту — УВПЛ, вводно-выводное устройство — ВВУ, устройство печати с клавиатурой — УПК, устройство печати технологической информации — УПИ, станция индикации данных — СИД-1000, таймер — ТМР.

- устройство печатающее параллельное — УПП, накопители на магнитных лентах и дисках — НМЛ, НМД и др.);

- устройства связи с объектом (УСО), выполняющие функции приема аналоговых и дискретных сигналов, поступающих от технологических объектов, нормализацию и коммутацию этих сигналов, преобразование и передачу информации от вычислительного комплекса на технологические объекты;

- устройства-согласователи, служащие для стыковки между отдельными устройствами и вычислительными комплексами (согласователь сопряжений — СКА, дуплексный регистр — ДР, модуль быстрой передачи данных — МБПД, разветвитель сопряжения 2К—РС и др.).

Минимальная конфигурация вычислительного комплекса М-6000 АСВТ-М включает процессор, два блока оперативной памяти емкостью по 8 Кбайт, устройство ввода с перфоленты на базе фотосчитывателя FS-1501, устройство вывода на перфоленту на базе перфоратора ПЛ-150, устройство ввода-вывода с телетайпом Т-63 и устройство питания.

Все соединения внешних устройств с процессором производятся с помощью унифицированного стандартного сопряжения 2К, реализуемого в виде двух разъемов, размещенных в конструкции процессора, РВВ или КПДП, в которые может вставляться интерфейсная карта размером 235×140 мм, содержащая всю схему управления устройствами ввода-вывода. Процессор имеет восемь выходов на сопряжение 2К. Подключая к нему один, два или три РВВ, можно соответственно увеличить число выходов до 22, 38 или 54.

Кроме передачи информации через процессор может быть использован канал прямого доступа в память, позволяющий производить запись и выдачу информации без загрузки процессора непосредственно в оперативную память, а из нее — в одно из внешних устройств.

В комплексах М-6000 используется двоичная форма представления чисел с фиксированной и плавающей запятой. Основная форма представления информации и команд 18-разрядное слово.

На основе процессора и внешних устройств можно компоновать как типовые, так и специфицированные (по спецификации пользователя) комплексы, состав которых определяется кругом решаемых задач. В качестве примера на рис. 6.6 приведена структурная схема типового комплекса № 3.

Центральным устройством комплекса является процессор (Пр), осуществляющий обмен информацией с оперативной памятью, устройствами ввода-вывода и устройствами связи с объектом, а также арифметическую и логическую обработку информации и выдачу результатов вычислений.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) выполнено в виде четырех модулей емкостью по 4 Кслов (непосредственно к процессору могут подключаться два блока, в случае применения устройства наращивания памяти количество блоков можно довести до 8).

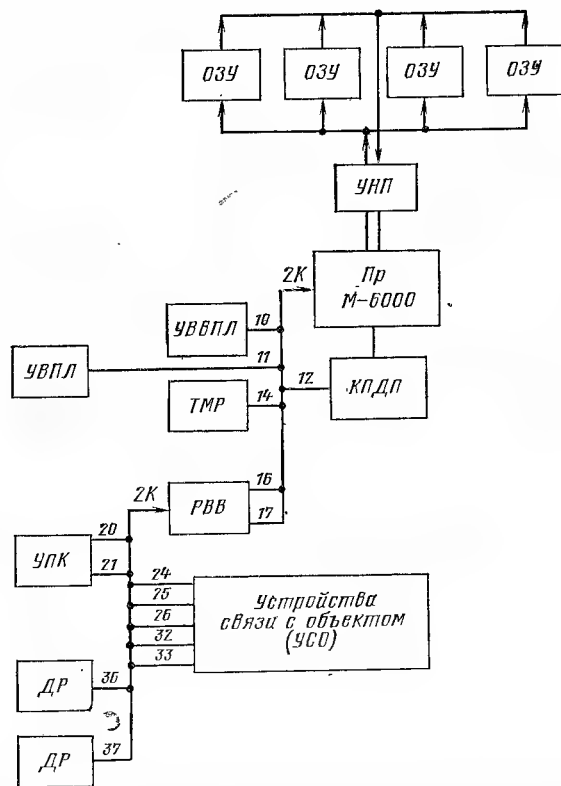


Рис. 6.6. Структурная схема типового комплекса № 3 М-6000.

Устройства ввода-вывода, в том числе таймер (ТМР), устройство вывода на перфоленту (УВВПЛ), устройство ввода с перфоленты (УВВПЛ) подключены через сопряжение 2К непосредственно к процессору. Расширитель ввода-вывода (РВВ) и канал прямого доступа к памяти (КПДП) используют по два выхода на сопряжение 2К. Через расширитель к процессору подключается устройство печати (УПК) «Консул-260», два дуплексных регистра (ДР) для обмена информацией с устройствами, не имеющими выхода на

сопряжения 2К, и развитая система устройств связи с объектом (УСО), которая более подробно рассматривается в § 6.7.

Одновременно с техническими средствами потребителю поставляется система программного обеспечения.

Система подготовки программ включает трансляторы с МНМОКОДА (машинно-ориентированного языка для символического представления машинных команд), трансляторы с ФОРТРАНа (проблемно-ориентированного языка для программирования задач в области науки и техники), трансляторы с АЛГОЛа и программу-редактор символьной информации.

В систему организации вычислений входят: система ввода-вывода для абсолютных программ; основная управляющая система для перемещаемых программ; супервизор реального времени, управляющий выполнением задач согласно их временным характеристикам; библиотеки стандартных подпрограмм; интерпретирующая система БЭЙСИК для решения задач в режиме диалога «человек—машина»; тестовая система для проверки правильности функционирования комплекса.

Для повышения производительности и живучести в комплексах М-6000 предусмотрен многопроцессорный режим работы, осуществляемый с помощью каналов межпроцессорной связи (КМС) и устройств-согласователей (дуплексных регистров, модулей быстрой передачи данных, разветвителей сопряжения 2К).

**Управляющие вычислительные комплексы М-7000** komponуются на базе усовершенствованных агрегатных модулей АСВТ-М предназначены для использования в АСУ ТП различных отраслей промышленности, в том числе в АСУ ТП ТЭС и АЭС. Внешний вид комплекса М-7000 представлен на рис. 6.7.

По сравнению с комплексами М-6000 комплексы М-7000 обеспечивают более высокую производительность, благодаря более короткому циклу обращения в ОЗУ, что при наличии универсального арифметического расширителя (РАУ) с микропрограммной памятью приводит к уменьшению времени выполнения вычислительных операций.

В комплексах М-7000 предусмотрена совместимость с комплексами М-6000 по форматам данных и по программному обеспечению. В качестве сопряжения ввода-вывода используется стандартное сопряжение 2К, и все периферийные устройства (в том числе устройства свя-

зи с объектом), входящие в номенклатуру комплексов М-6000, могут быть применены в системах, komponуемых на базе комплексов М-7000.

На базе процессора М-7000 обеспечивается возможность компоновки двухпроцессорной системы с общим полем памяти и общими периферийными устройствами (ПУ) (рис. 6.8).

Связь процессоров с оперативными запоминающими устройствами (ОЗУ) производится через шину памяти, к которой с одной стороны подключаются два процессора М-7000 и два КПДП, а с другой — до восьми блоков ОЗУ общей емкостью 128 К слов. Процессоры и каналы прямого доступа в память могут работать с любым запоминающим устройством независимо друг от друга.



Рис. 6.7. Внешний вид управляющего вычислительного комплекса М-7000.

Связь с общими периферийными устройствами осуществляется через шину ввода-вывода. К периферийной стороне шины ввода-вывода подключается до трех расширителей ввода-вывода РВВ, в свою очередь к каждому из них можно подключить до 16 периферийных устройств через стандартное сопряжение 2К.

Используемый в комплексе М-7000 универсальный арифметический расширитель (РАУ) с микропрограммной памятью позволяет расширять набор выполняемых процессором команд по микропрограммам. В качестве микропрограммной памяти используется постоянное запоминающее устройство на ферритовых сердечниках.

Операционные системы комплексов М-7000 komponуются с помощью специальных генераторов из набора программных модулей (с учетом конфигурации технических средств, набора задач и режима работы).

При работе в двухпроцессорной системе в случае отказа одного из процессоров предусматривается авто-

матический переход к решению всех задач на втором работающем процессоре.

На комплексах М-7000 можно также выполнять все стандартные программы, входящие в состав системы программного обеспечения комплексов М-6000.

Управляющие вычислительные комплексы М-400 предназначены для применения в системах автоматизации научных исследований, в АСУ ТП, а также для решения инженерно-технических задач.

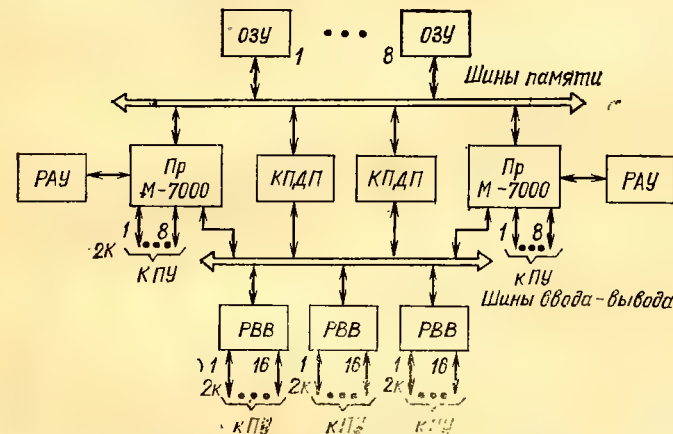


Рис. 6.8. Структурная схема двухпроцессорного комплекса М-7000.

Особенностью построения комплексов М-400 является возможность объединения всех устройств комплекса в систему с помощью единого комплекса линий связи, называемого общей шиной. Общая шина включает 56 линий, по которым передаются адреса, команды, сигналы управления, информация о состоянии периферийных устройств. Процессор при этом использует один и тот же набор сигналов как для связи с памятью, так и для связи с периферийными устройствами. Периферийные устройства в свою очередь подсоединяются к общей шине с помощью интерфейсных блоков, размещаемых в блоке общей шины. Устройства связи с объектом, выполненные на основе модулей М-6000 и имеющие выход на сопряжение 2К, подключаются с помощью блока согласования сопряжений ОШ-2К.

Структурная схема базового комплекса М-400 приведена на рис. 6.9. В состав комплекса входят процессор (Пр), оперативное



Входящий в состав комплекса «М-400» процессор имеет быстродействие до 400 000 операций в секунду. Оперативное запоминающее устройство строится на основе модулей емкостью 16 Кбайт с временем цикла обращения 1,2 мкс. Максимальный объем памяти может быть доведен до 48 Кбайт. В базовую конфигурацию комплекса «М-400» входят печатающее устройство «Консул-260», перфокарточное устройство ввода-вывода с фотосчитывателем FS-1501 и перфоратором ПЛ-150. В числе других подключаемых устройств могут быть устройства внешней памяти на магнитных дисках и лентах, устройства связи с объектом и оперативный персонал.

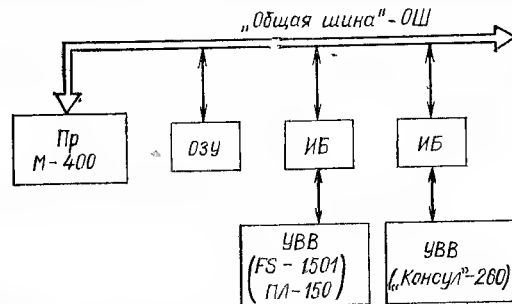


Рис. 6.9. Структурная схема комплекса М-400.

Перфоленточная система предназначена для использования в базовой конфигурации системы при наличии ОЗУ емкостью 16 Кбайт.

Система реального времени предназначена для использования при решении задач АСУ ТП. В этом случае в состав комплексов М-400 вводятся устройства связи с объектом, а объем оперативной памяти увеличивается до 32 Кбайт.

Система РВС-400 позволяет организовать одновременную работу до 120 независимых программ, выполняющих функции управления.

Дисковая операционная система осуществляет обработку данных и отладку программ в диалоговом режиме. Системные программы и программы пользователя хранятся на магнитном диске. В этом случае необходимо иметь не менее двух дисков и оперативную память объемом 32 Кбайта.

**Управляющие вычислительные комплексы М-4030** представляют собой наиболее производительную и развитую систему, построенную на базе АСВТ-М, и применяются, как правило, в качестве центрального вычислительного устройства для решения задач диспетчеризации производства, материально-технического снабжения в рамках АСУ предприятия. С учетом иерархического принципа построения таких систем управления на рис. 6.10 рассматривается вариант совместной работы комплекса М-4030 с комплексами подключаемыми с помощью аппаратов (АПД) и применяющимися технологических объектах. Каждый уровень имеет развитую связь с объектом, а комплексы М-400 и пульты (дисплеи).

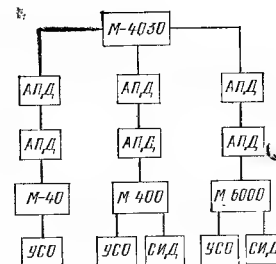


Рис. 6.10. Схема совместной работы комплекса М-4030 с машинами серии АСВТ-М нижнего уровня.

По функциональному назначению (рис. 6.11) агрегатные устройства, входящие в состав комплексов М-4030, делятся на следующие группы: процессор (Пр), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), внешнее запоминающее устройство (ВЗУ) и устройства ввода-вывода (УВВ).

Процессор производительностью 100 тыс. операций в секунду с микропрограммным способом управления имеет блок памяти микрокоманд емкостью 384 тридцатистизрадных слов для хранения содержания регистров и другой вспомогательной информации.

Оперативная память имеет емкость 128 Кбайт и может наращиваться до 512 Кбайт. Время цикла обращения 2 мкс.

В качестве запоминающих устройств используются накопители на магнитной ленте (НМЛ) и на дисках (НМД), подключаемые через интерфейсы.

Устройства ввода-вывода обеспечивают ввод информации с перфокарт (УВВПК) и перфолент (УВВПЛ), вывод на перфокарты

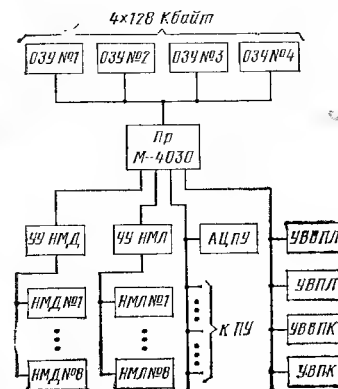


Рис. 6.11. Структурная схема комплекса М-4030.

(УВПК) и на перфоленты (УВПЛ), а также на алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ).

Программное обеспечение комплексов М-4030 (СПО) состоит из операционной системы ОС АСВТ и дисковой операционной системы ДОС АСВТ. Операционная система ОС АСВТ включает в себя организующую систему (трансляторы, обслуживающие программы, библиотеку стандартных подпрограмм, библиотеку проблемно-ориентированных программ, тестовую систему) и обеспечивает работу в мультипрограммном режиме с одновременным решением до 14 задач.

Дисковая операционная система ДОС АСВТ позволяет транслировать, отлаживать и выполнять программы при наличии в составе комплексов накопителей на магнитных дисках.

## 6.5. Международная система малых машин СМ ЭВМ

Страны социалистического содружества, подписавшие соглашение по сотрудничеству в области вычислительной техники, кроме машин общего назначения (ЕС ЭВМ) разрабатывают и успешно осваивают систему малых вычислительных машин (СМ ЭВМ).

Международная система СМ ЭВМ создается как агрегатная система технических и программных средств для построения УВК, используемых в автоматизированных системах управления технологическими процессами, системах автоматизации научных исследований, системах автоматизации проектирования и т. п.

По существу, две международные системы ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ — в совокупности, дополняя друг друга, становятся технической базой автоматизации управления и обработки информации во всех сферах народного хозяйства социалистических стран.

Первая очередь системы СМ ЭВМ включает в себя ряд процессоров различной производительности (до 1 млн. операций в секунду), на основе которых komponуются комплексы СМ-1, СМ-2, СМ-3 и СМ-4.

Вторая очередь системы СМ ЭВМ базируется на применении больших интегральных схем (БИС) для построения программируемых контроллеров, периферийных устройств и микропроцессорной реализации некоторых моделей СМ ЭВМ (например, СМ-1800 и др.). Вторая очередь предусматривает создание периферий-

ного оборудования с более высокими показателями, в том числе устройства на новых принципах: внешняя память на цилиндрических магнитных доменах, лазерные печатающие устройства, твердотельные устройства отображения, адаптивные устройства считывания текста (в том числе рукописного), устройства речевого ввода и вывода.

Важным направлением является облегчение для пользователя программирования разнообразных прикладных задач, создание библиотеки готовых программных модулей, которые требовали бы от пользователя указания только необходимых функций (что система должна сделать), избавляя его от забот о том, как она это будет выполнять. Ведется разработка анкетных систем программирования для системы СМ ЭВМ (типа «заполни бланк»). Актуальна задача реализации специализированного языка управления в реальном масштабе времени. Предусматривается также организация единого фонда программного обеспечения. Ниже приводятся некоторые сведения по комплексам СМ-1, СМ-2, СМ-3 и СМ-4.

Управляющие вычислительные комплексы СМ-1 и СМ-2 komponуются на базе процессоров СМ-1П и СМ-2П с использованием периферийных устройств комплексов М-6000 и М-7000 АСВТ-М и обладают программной совместимостью с ними.

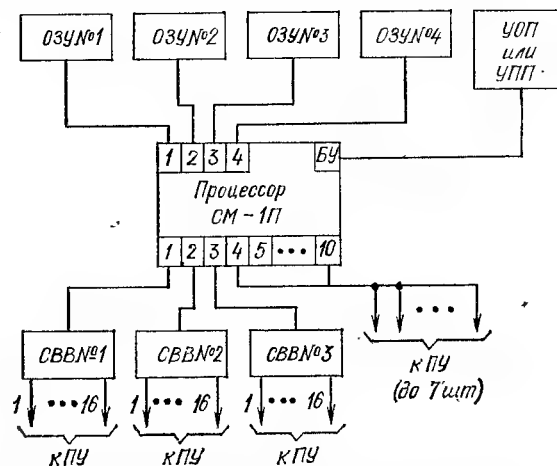


Рис. 6.12. Структурная схема комплекса СМ-1.

На базе комплексов СМ-1 и СМ-2 можно компоновать локальные и территориально рассредоточенные многомашинные комплексы. Передача информации в таких комплексах, а также между комплексами и терминалами может осуществляться по телефонным, телеграфным и специальным линиям связи.

Структурная схема комплекса СМ-1 приведена на рис. 6.12.

Процессор (Пр СМ-1П) работает по принципу микропрограммного управления с емкостью управляющей памяти 4096 18-разрядных слов. В процессор встраивается канал прямого доступа к памяти, также имеющий микропрограммный принцип управления. Конструктивно процессор СМ-1П выполнен в виде автономного комплектного блока, в котором размещаются:

собственно процессор (включая микропрограммную память), канал прямого доступа в память и инженерная панель;

блок управления оперативной памяти (БУ), обеспечивающий подключение устройства оперативной памяти (УОП) емкостью до 16 Кслов 18-разрядных;

до 4 блоков ОЗУ общей емкостью 16 Кслов;

до 10 интерфейсных блоков периферийных устройств, выходящих на стандартное сопряжение 2К.

Каждый блок оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) имеет емкость 4 Кслов 18-разрядных (16 информационных разрядов и 2 контрольных).

Устройство оперативной памяти (УОП) предназначено для расширения объема оперативной памяти до 32 Кслов.

Устройство постоянной памяти (МП), может подключаться к процессору вместо УОП и имеет такую же емкость. Устройство постоянной памяти предназначено для хранения постоянных программ и констант. Обращение к ячейкам МП такое же, как и к оперативной памяти. Конструктивно УОП и МП выполнены в виде автономных комплектных блоков, в которых размещаются: блоки памяти, блоки управления и интерфейсные блоки для подключения к процессору.

Согласователь ввода-вывода (СВВ) предназначен для увеличения числа подключаемых к процессору периферийных устройств. К процессору можно подключать до трех согласователей. В каждом согласователе имеется 16 выводов на сопряжение 2К, но для подключения каждого согласователя занимает один из выходов 2К в процессоре.

Согласователь ввода-вывода выполняется в виде автономного комплектного блока. Все рассмотренные блоки размещаются в типовой стойке.

Структурная схема комплекса СМ-2 приведена на рис. 6.13.

Процессор Пр СМ-2П работает по принципу микропрограммного управления с емкостью управляющей памяти 4096 36-разрядных слов. Емкость оперативной памяти от 32 К до 128 Кслов 18-разрядных. Процессор выполнен в виде автономного комплектного блока с инженерной панелью, в котором размещены собственно процессор и управляющая память.

В процессоре также предусмотрено место для установки восьмиканального коммутатора КМР-8, с помощью которого осуществляется связь процессора с устройствами оперативной памяти (УОП) и согласователями ввода-вывода (СВВ).

Процессор СМ-2П устанавливается в типовой стойке совместно с другими агрегатными модулями. Блок устройства оперативной памяти (УОП) имеет емкость 32 Кслов 18-разрядных. Оперативная память выполняется в виде автономного комплекта, в котором размещаются блоки оперативной памяти, источники питания, вентиляторы, а также предусмотрено место для установки четырехканального коммутатора КМР-4, с помощью которого осуществляется связь с процессором СМ-2П и каналами прямого доступа в память (КПДП).

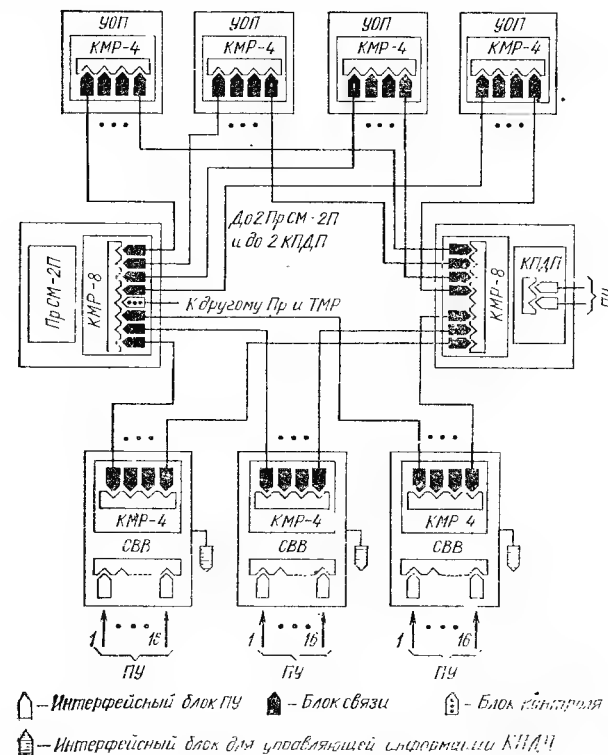


Рис. 6.13. Структурная схема комплекса СМ-2.

Согласователь ввода-вывода предназначен для подключения к процессору периферийных устройств (до 16 выходов на сопряжение 2 К). Согласователь ввода-вывода выполнен в виде автономного комплектного блока, в котором предусмотрены места для установки до 16 интерфейсных блоков и коммутатора четырехканального КМР-4, с помощью которого согласователь подключается к процессору и каналу прямого доступа в память.

Канал прямого доступа в память предназначен для быстрого обмена информацией между устройствами оперативной памяти и периферийными устройствами и может обслуживать одновременно



Таблица 6.2. Характеристики комплексов АСВТ-М и СМ ЭВМ

| Наименование                                               | Марка комплекса |      |        |       |
|------------------------------------------------------------|-----------------|------|--------|-------|
|                                                            | М-6000          | СМ-1 | М-7000 | СМ-2  |
| Максимальный объем оперативной памяти, Кслов, 18-разрядных | 32              | 32   | 128    | 128   |
| Объем микропрограммной памяти, Кбайт                       | —               | 8    | 8      | 16    |
| Время выполнения основных операций, мкс:                   |                 |      |        |       |
| сложения с фиксированной запятой                           | 5               | 2,5  | 2,5    | 2,2   |
| умножения с фиксированной запятой                          | 43              | 36,6 | 11     | 10    |
| сложения с плавающей запятой                               | —               | —    | 35     | 18—40 |
| умножения с плавающей запятой                              | —               | —    | 35     | 23    |

до четырех устройств ввода-вывода, подключаемых через согласователь, или одно устройство ввода-вывода, подключаемое непосредственно к КППДП. Канал прямого доступа в память выполняется в виде автономного комплектного блока, в котором размещены собственно канал доступа, а также предусмотрено место для установки восьмиканального коммутатора КМР-8.

Коммутаторы восьмиканальные КМР-8 и коммутаторы четырехканальные КМР-4 предназначены для обеспечения внутрисистемных связей между устройствами вычислительного комплекса СМ-2.

По техническим параметрам и структурным возможностям комплексы СМ-1 и СМ-2 полностью заменяют соответственно комплексы М-6000 и М-7000. Сравнительные характеристики комплексов приведены в табл. 6.2.

**Программное обеспечение комплексов СМ-1 и СМ-2** включает операционные системы, библиотеки, проблемно-ориентированные пакеты программных модулей, систему подготовки программ. Сервисные и контрольно-диагностические программы поставляются по спецификации заказчика в виде набора программных модулей, из которых пользователь komponует требуемую программную систему. Кроме того, пользователям по их требованию могут поставляться операционные системы комплексов М-6000.

Для применения вычислительных комплексов СМ-1 и СМ-2 в АСУ ТП разработан и поставляется пакет прикладных программ (ППП), позволяющий без предварительного программирования компоновать системы сбора, анализа и обработки технологической информации. Для аналоговых сигналов можно осуществлять расчет действительных значений, линеаризацию, введение поправок

Таблица 6.3. Состав базовых вычислительных комплексов СМ-1

| Наименование модулей                          | Комплекс № 1 | Комплекс № 2 | Комплекс № 4 | Комплекс № 5 |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Процессор СМ-1П                               | 1            | 1            | 1            | 1            |
| Устройство оперативное запоминающее           | 2            | 4            | 4            | 2            |
| Согласователь ввода-вывода                    | —            | 1            | 1            | —            |
| Таймер                                        | 1            | 1            | 1            | 1            |
| Устройство ввода с перфоленты                 | 1            | 1            | 1            | —            |
| Устройство вывода на перфоленту               | 1            | 1            | 1            | —            |
| Устройство внешней памяти на магнитных дисках | —            | 1            | 1            | —            |
| Дисплейный модуль ДМ-2000                     | 1            | 1            | 1            | —            |
| Устройство последовательной печати            | 1            | 1            | 1            | —            |
| Устройство параллельной печати                | —            | 1            | —            | —            |
| Модуль быстрой передачи данных                | 2            | 2            | 2            | —            |

по температуре и давлению и пр. Подготовка задания на генерацию задач сбора информации выполняется на проблемно-ориентированном языке пакета, для пользования которым специальных знаний в области программирования не требуется.

В зависимости от назначения комплексы СМ-1 и СМ-2 подразделяются на базовые, типовые и специфицированные. Базовые комплексы являются ядром для компоновки на их основе типовых комплексов. Специфицированные комплексы komponуются по спецификации заказчика с использованием полного набора агрегатных модулей.

Составы базовых и типовых комплексов выбираются таким образом, чтобы при компоновке специфицированных комплексов отсутствовала избыточность в поставляемых средствах, а объем дополнительно подключаемых модулей был по возможности минимальным. Составы некоторых базовых и типовых комплексов СМ-1 и СМ-2 приведены в табл. 6.3 и 6.4.

В качестве примера на рис. 6.14 приведена структурная схема базового комплекса СМ-2. Кроме модулей, перечисленных в таблицах, имеется широкий набор устройств внутрисистемной и внесистемной связи, устройств ввода-вывода и внешней памяти, модулей связи с объектом. Из модулей УСО можно назвать модули аналого-цифрового преобразования, коммутаторы бес-

Таблица 6.4. Состав типовых вычислительных комплексов СМ-2

| Наименование модулей                             | Комплекс № 2 | Комплекс № 3* | Комплекс № 5 | Комплекс № 10 |
|--------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Процессор СМ-2П                                  | 2            | 2             | 1            | 2             |
| Устройство оперативной памяти                    | 4            | 2             | 2            | 4             |
| Канал прямого доступа в память                   | 2            | 2             | 2            | 2             |
| Согласователь ввода-вывода                       | 2            | 2             | 2            | 3             |
| Коммутатор КМР-8                                 | 4            | 4             | 2            | 4             |
| Коммутатор КМР-4                                 | 4            | 2             | 2            | 4             |
| Устройство подготовки данных на перфоленте УКР-3 | 1            | 1             | 1            | 1             |
| Таймер                                           | 2            | 2             | 1            | 2             |
| Устройство ввода с перфоленты                    | 1            | —             | 1            | 1             |
| Устройство вывода на перфоленту                  | 1            | —             | 1            | 1             |
| Устройство внешней памяти на магнитных дисках    | 1            | —             | —            | —             |
| Устройство параллельной печати                   | 1            | —             | 1            | —             |
| Дисплейный модуль ДМ-2000                        | 1            | —             | 1            | 2             |
| Модуль быстрой передачи данных                   | 2            | —             | 2            | 4             |
| Устройство печати знаковосинтезирующее           | 1            | —             | 1            | 1             |
| Блок связи                                       | 32           | 16            | 8            | 40            |
| Регистр дуплексный                               | —            | —             | 2            | 2             |

\* Комплекс № 3 является базовым вычислительным комплексом.

контактные, преобразователи «код-ток» и др.

**Управляющие вычислительные комплексы СМ-3 и СМ-4.** Основной особенностью комплексов является однотипная организация связей процессора с оперативной памятью и внешними устройствами. В качестве интерфейса ввода-вывода в комплексах СМ-3 и СМ-4 используется унифицированный интерфейс «общая шина» — ОШ. Все устройства, в том числе и сам процессор, подключены к общему последовательно-параллельному каналу обмена. Каждое устройство периодически выставляет запрос на использование канала. Обработку запроса осуществляет специальный блок диспетчера, управляемый от процессора. Комплексы СМ-3 и СМ-4 имеют программную совместимость с комплексами М-400.

По функциональному составу базовые конфигурации комплексов СМ-3 и СМ-4 в основном совпадают. Для ввода информации предусмотрены устройство ввода с перфоленты и клавиатура алфавитно-цифрового терми-

нала. Хранение информации осуществляется либо в ферритовом оперативном запоминающем устройстве емкостью 32 Кслов 18-разрядных, либо на магнитных дисках. Объем дисковой памяти 9,6 Мбайт.

Программы, хранящиеся на дисках, могут вводиться с дисков в оперативную память. Для вывода информации используется алфавитно-цифровой дисплей и печатающее устройство матричного типа среднего быстродей-

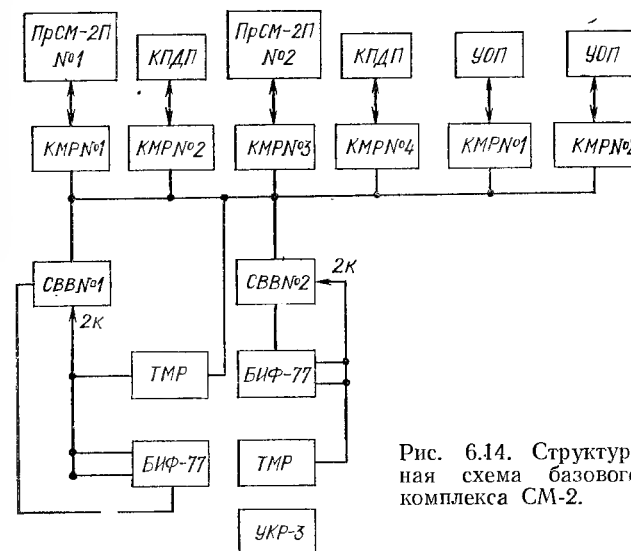


Рис. 6.14. Структурная схема базового комплекса СМ-2.

ствия. В составе базового комплекса СМ-4 имеется ряд модулей, расширяющих по сравнению с базовым комплексом СМ-3 функциональные возможности и улучшающих эксплуатационные показатели комплекса, среди них — таймер, обеспечивающий синхронизацию в задачах реального времени, и аппаратный загрузчик, упрощающий процедуру начальной загрузки системы. Предусмотрено также подключение к комплексам устройств связи с объектом.

Основная часть базовых комплексов СМ-3 и СМ-4 монтируется в двух стойках; в левой стойке размещают процессор, оперативное запоминающее устройство, перфоленточное устройство ввода-вывода; в правой стойке устанавливается накопитель на магнитных дисках.

Некоторые характеристики комплексов СМ-3 и СМ-4 приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Характеристики комплексов СМ-3 и СМ-4

| Наименование                    | Комплекс СМ-3 | Комплекс СМ-4 |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Быстродействие, тыс. операций/с | 250           | до 800        |
| Емкость ОЗУ, Кбайт              | 64            | 64÷256        |
| Цикл обращения к памяти, мкс    | 1,1÷1,2       | 1,1÷1,2       |
| Защита памяти                   | Нет           | Есть          |

## 6.6. Микропроцессоры и микро-ЭВМ

В распоряжение разработчиков АСУ ТП поступил новый класс средств вычислительной техники, использующий большие интегральные схемы (БИС). К этому классу относятся микропроцессоры и микро-ЭВМ.

Микропроцессором называют функционально законченное устройство обработки цифровой информации, управляемое хранимой в памяти программой и конструктивно выполненное в виде одной или нескольких БИС. Микропроцессор по своим логическим функциям и структуре напоминает упрощенный вариант процессора обычных ЭВМ и оперирует с коротким словом от 4 до 16 разрядов.

Микро-ЭВМ представляет собой комплекс устройств, выполненных на БИС, состоящий из микропроцессора, устройств памяти и средств связи с периферийными устройствами.

Первые четырехразрядные микропроцессоры Intel-4004 (США) имели сравнительно низкое быстродействие, что ограничивало область их применения (устройства цифровой промышленной автоматики, малогабаритные калькуляторы, периферийные устройства ЭВМ и пр.). Дальнейшее развитие микропроцессоры получили на основе БИС на схемах транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), обладающих значительно большим быстродействием.

В структуре микропроцессора можно выделить три основные части: центральный процессор, постоянную память микропрограмм и блок управления.

Центральный процессор содержит арифметико-логическое устройство (АЛУ), сверхоперативную память на регистрах, а также функциональные регистры. Схемы АЛУ выполняют команды сложения, вычитания, логиче-

ского И, логического ИЛИ, сложения по модулю 2 и команды сдвигов. Более сложные команды реализуются при помощи подпрограмм.

Из-за ограниченного количества выводов корпуса БИС (от 18 до 42) не удается реализовать интерфейс микропроцессора с высокой пропускной способностью. Поэтому микропроцессоры имеют так называемый *общий интерфейс*, обслуживающий как внешнюю оператив-

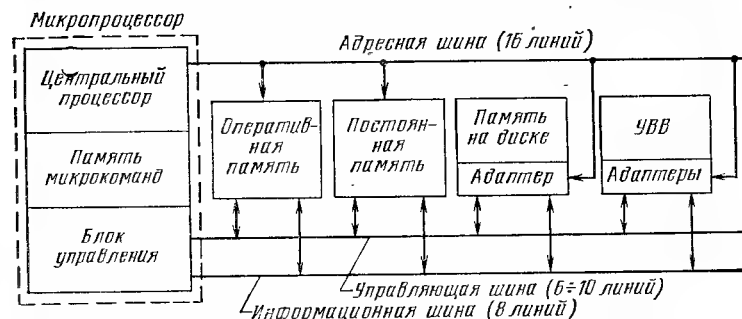


Рис. 6.15. Структура микро-ЭВМ.

скую память, так и периферийные устройства. В микропроцессоре с корпусом на 40 выводов для интерфейса выделяется 30—34 вывода (например, 16 адресных линий — адресная шина, 8 информационных линий — информационная шина и 6—10 управляющих — управляющая шина).

На рис. 6.15 представлена структура микро-ЭВМ общего назначения. В состав микро-ЭВМ входят постоянная (ПЗУ) и оперативная (ОЗУ) память на БИС, а также внешние запоминающие устройства на гибких магнитных дисках (НМД) и устройства ввода-вывода (УВВ).

По вычислительным характеристикам микро-ЭВМ приближаются к современным малым ЭВМ, по ряду эксплуатационных показателей (размеры, потребляемая мощность, надежность) их превосходят, однако из-за малого числа подключаемых периферийных устройств применение микро-ЭВМ в настоящее время ограничивается системами с небольшим числом источников и потребителей информации.

Подготовка и отладка программ для микро-ЭВМ затруднена из-за небольшой емкости оперативной памяти и ограниченного набора периферийных устройств.

Таблица 6.6. Технические характеристики микро-ЭВМ

| Характеристика                  | Марка микро-ЭВМ  |        |         |                  |
|---------------------------------|------------------|--------|---------|------------------|
|                                 | «Электроника С5» | ПС-300 | СМ-1800 | «Электроника-60» |
| Разрядность, двоичные разряды   | 16               | 16     | 8       | 16               |
| Быстродействие, тыс. операций/с | 10               | 50     | 250     | 250              |
| Память, Кбайт                   | 64               | 20     | 64      | 64               |

В связи с этим для подготовки программ микро-ЭВМ широко используются комплексы М-4030, СМ-3, СМ-4.

Технические характеристики некоторых типов отечественных микро-ЭВМ приведены в табл. 6.6.

Микро-ЭВМ все шире начинают применяться в АСУ ТП. В качестве примера рассматривается установка централизованного контроля, разработанная в НПО Лентепприбор. В установке в качестве центрального управля-

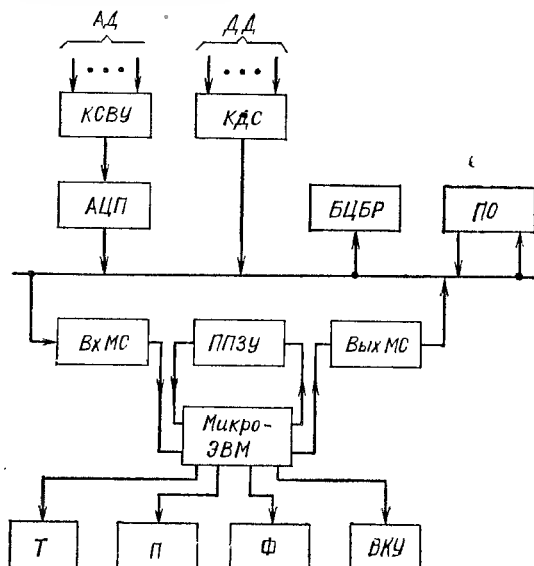


Рис. 6.16. Схема использования микро-ЭВМ в системе контроля.

АД — аналоговые датчики; ДД — двухпозиционные датчики; КСВУ — блок коммутации аналоговых сигналов высокого уровня; КДС — модули инициативной коммутации двухпозиционных сигналов; БЦБР — блок цифробуквенной регистрации; ПУ — пульт оператора; ВхМС, ВыхМС — входной и выходной модули связи; ППЗУ — полупостоянное запоминающее устройство; Т — телеграф; П — перфоратор (ПЛ-150); Ф — фотосчитыватель (ФС-1501); ВКУ — видеокамерное устройство.

ющего устройства использована микро-ЭВМ «Электроника С5-02».

Микропроцессорное устройство А 330-25 (рис. 6.16) обеспечивает сбор, измерение, обработку и представление до 64 унифицированных аналоговых и 40 двухпозиционных сигналов. Последовательность опроса входных параметров определяется программой.

Для технического обеспечения в АСУ ТП непосредственного цифрового регулирования разработано управляющее микропроцессорное устройство А 360-34, осуществляющее непосредственное воздействие на объект путем формирования и выдачи управляющих аналоговых и дискретных сигналов на исполнительные механизмы постоянной скорости и двухпозиционные исполнительные механизмы.

Установка А 360-34 (рис. 6.17) построена на базе двух устройств А 330-25, соединенных таким образом, что они могут работать и в режиме взаимодополнения для увеличения информационной и вычислительной мощности (обмен информацией по каналу I), и в режиме резервирования с выдачей информации от каждого устройства А 330-25 (канал II) на выходное управляющее устройство (ВУС). Предусмотрена также возможность полного отключения устройства с безударным переходом на ручное управление, для чего в устройстве ВУС имеются специальные задатчики с индикацией состояния исполнительных механизмов как в режиме ручного, так и автоматического управления.

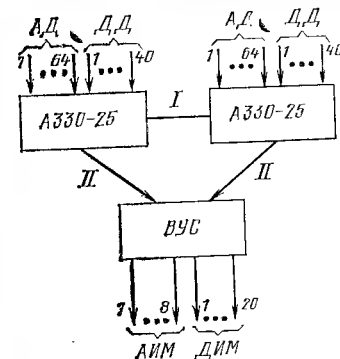


Рис. 6.17. Схема использования микро-ЭВМ в системе управления.

ВУС — выходное управляющее устройство; АИМ, ДИМ — аналоговый и дискретный исполнительные механизмы.

Получили развитие микро-ЭВМ на перестраиваемых структурах. К их числу следует отнести комплекс ПС-300, использующий проблемно-ориентированные команды, что позволяет комплектовать его эффективными пакетами прикладных программ. Комплекс ПС-300 может применяться для управления технологическими процессами в составе АСУ ТП, а также в качестве встроенного вычислителя в различных приборах, выполняя при этом следующие функции:

сбор и первичную обработку информации в реальном масштабе времени;

выдачу управляющих воздействий;

включение с пульта и выполнение в процессоре требуемых программ;

представление информации на цифровых приборах по вызову оператора и сигнализацию отклонений от нормы; передачу информации в УВК верхнего уровня.

Быстродействие машины составляет 50 тыс. операций в секунду, объем ОЗУ—10 240 16-разрядных слов, число подключаемых внешних устройств—до 12. Внешние устройства подсоединяются через стандартный ранг связи 2К.

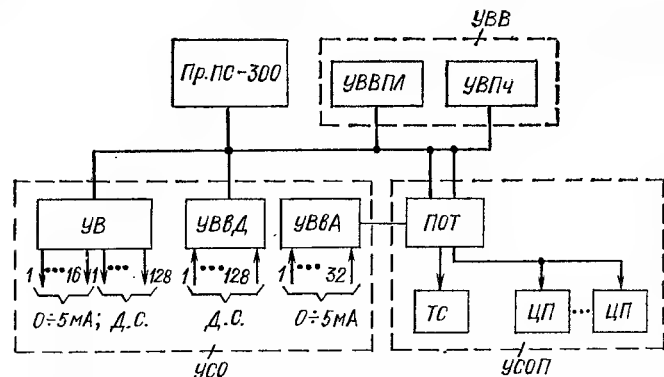


Рис. 6.18. Структурная схема базового комплекса ПС-300.

Базовый комплекс ПС-300 (рис. 6.18) включает в себя процессор (Пр. ПС-300); устройство ввода с перфоленты (УВВП); устройство вывода на печать (УВВЧ); устройство связи с объектом (УСО), в состав которого входит устройство ввода аналоговых сигналов (УВВА), рассчитанное на 32 входных сигнала 0—5 мА (на выходе 10-разрядный двоичный код); устройство ввода дискретных сигналов (УВВД), рассчитанное на 128 двухпозиционных входов; устройство вывода (УВ), выдающее 16 аналоговых сигналов 0—5 мА и 128 двухпозиционных сигналов. Максимальное расстояние от объекта до устройств связи 500 м. Предусмотрены также устройства связи с оперативным персоналом (УСОП) — пульт оператора-технолога (ПОТ), цифровые приборы (ЦП) и табло сигнализации (ТС).

Кроме рассмотренных в настоящее время разработана и осваивается 8-разрядная агрегатированная микро-ЭВМ СМ-1800, предназначенная для управления производственными процессами и агрегатами. Конструктивный и функциональный состав СМ-1800 переменный и

определяется потребностями заказчика. Общий максимальный объем оперативной и постоянной памяти составляет 64 Кбайта.

Структурная схема микро-ЭВМ СМ-1800 представлена на рис. 6.19. Логическая и арифметическая обработка информации, а также управление внешними устройствами осуществляются модулем центрального процессора (МЦП). Процессор содержит 2 Кбайта постоянной и 1 Кбайт оперативной памяти:

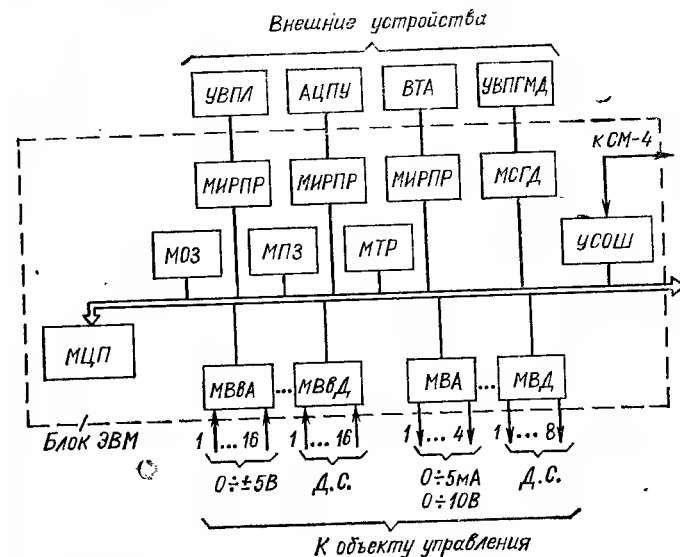


Рис. 6.19. Структурная схема микро-ЭВМ СМ-1800.

Память микро-ЭВМ выполнена в виде оперативного запоминающего модуля (МОЗ) емкостью 32 Кбайта, построенного на элементах полупроводниковой динамической памяти, и постоянного, запоминающего модуля (МПЗ) емкостью 4 Кбайта, построенного на микросхемах. Отсчет времени осуществляет таймер (МТР).

В качестве внешних устройств в СМ-1800 используются устройства внешней памяти на гибких магнитных дисках (УВПГМД), видеотерминал алфавитно-цифровой (ВТА), устройство печатающее алфавитно-цифровое (АЦПУ), устройство ввода и вывода перфоленточное (УВВП) и устройство связи с общей шиной (УСОШ), осуществляющее связь между микро-ЭВМ и машинами

СМ ЭВМ, имеющими выход на интерфейс «общая шина» (СМ-3, СМ-4).

Перечисленные внешние устройства подсоединяют к процессору с помощью специальных модулей связи: модуля сопряжения с накопителем на магнитном диске (МСГД), модулей связи с радиальным параллельным интерфейсом (МИРПР) для подключения видеотерминала, печатающего устройства и перфоленточного устройства ввода-вывода.

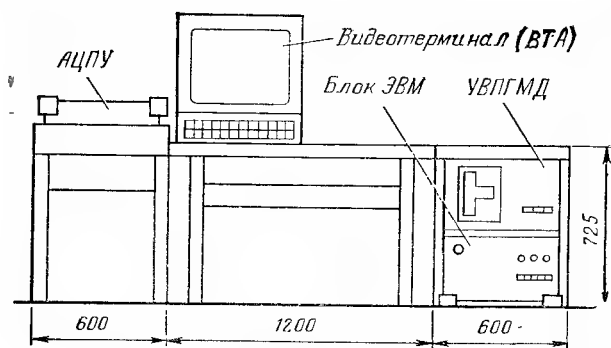


Рис. 6.20. Компоновка типового комплекса СМ-1800.

В состав устройств связи с объектом входят модули ввода аналоговых (МВВА) и дискретных (МВВД) сигналов (ДС) и соответственно модули вывода аналоговых (МВА) и дискретных (МВД) сигналов.

Компоновка типового комплекса на базе микро-ЭВМ СМ-1800 представлена на рис. 6.20.

Система программного обеспечения СПО СМ-1800 позволяет разрабатывать программы на языке ассемблера СМ-1800, готовить и редактировать текстовую информацию и создавать библиотеку программ на гибких магнитных дисках. В состав СПО СМ-1800 входят монитор, редактор текстов, транслятор с языка ассемблера и программы обслуживания библиотек.

В заключение следует отметить, что появление высоконадежных малых ЭВМ и микро-ЭВМ как технической базы управляющих вычислительных комплексов в значительной степени будет способствовать широкому внедрению АСУ ТП в народное хозяйство.

## 6.7. Устройства связи управляющих вычислительных комплексов с объектами управления и оперативным персоналом

### Структура и состав устройств связи

В автоматизированных системах управления технологическими процессами управляющие вычислительные комплексы имеют развитую систему устройств связи с объектом (УСО), с помощью которых принимаются информация о состоянии объекта управления, данные от оператора-технолога, а также выводятся рекомендации оператору-технологу, расчетные значения на системы отображения информации и управляющие сигналы на исполнительные механизмы.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт разработки АСУ ТП, создание системы устройств для обеспечения связи УВК с измерительными преобразователями и исполнительными устройствами, а также с оператором, ведущим процесс, является весьма сложной задачей. Комплекс таких устройств в зависимости от степени сложности системы управления может значительно превышать по объему и стоимости остальное оборудование УВК.

В системах связи УВК с объектами управления для передачи информации используются, как правило, электрические сигналы, что обусловлено широким набором соответствующих датчиков, удобством передачи сигнала по линиям связи, а также удобством их применения в исполнительных устройствах. Формой электрического сигнала большинства датчиков является ток или напряжение. В ряде случаев используется изменение сопротивления, емкости или индуктивности. Чаще всего выходом измерительных устройств является сигнал постоянного тока, диапазоны изменения которого унифицированы и утверждены соответствующими стандартами. Сигналы с диапазонами изменения, не превышающими 100 мВ, обычно относятся к сигналам низкого уровня, а сигналы 0—10 В и 0—5 мА относятся к сигналам высокого уровня (иногда уровень сигналов 0—5 мА называют средним).

Аналоговая информация в каналах АСУ ТП передается сигналами как низкого, так и высокого уровня. Информация дискретного типа передается в основном с помощью сигналов высокого уровня. В случае применения

в АСУ ТП измерительных датчиков с неунифицированными выходными сигналами приходится использовать различные согласующие элементы, однако это создает дополнительные погрешности и усложняет систему передачи информации.

Информация в АСУ ТП передается по каналам, в состав которых входят линии связи, а также устройства согласования, формирования и преобразования сигналов.

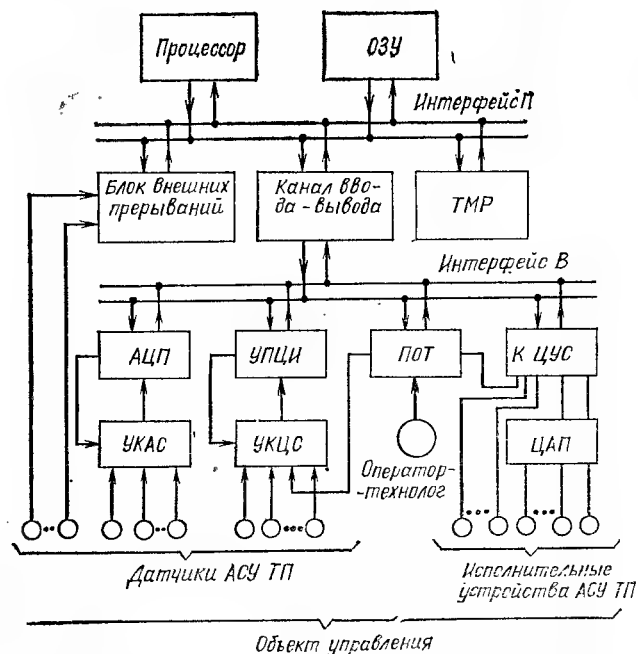


Рис. 6.21. Структура устройств связи с объектом и оперативным персоналом.

Важное и принципиальное место в УСО занимают устройства коммутации сигналов, обеспечивающие передачу информации в УВК от многих источников и от УВК на большое количество исполнительных механизмов.

Коммутаторы обеспечивают поочередную передачу сигналов через общий узел устройства, используя метод разделения каналов во времени. С помощью коммутаторов осуществляется подключение сигнала в дискретные моменты времени, задаваемые сигналами управления. Как уже отмечалось, аналоговые сигналы при передаче

в процессор УВК преобразуются в цифровой код. Поэтому в канале происходит процесс квантования сигнала не только во времени, но и по величине (уровню).

Обобщенная структура технических средств, обеспечивающих связь с объектом, приведена на рис. 6.21. Средства, при помощи которых организуется поток измерительной информации, разделяются на две группы соответственно для передачи аналоговых и двухпозиционных или цифровых сигналов.

К первой группе относятся устройства коммутации аналоговых сигналов (УКАС) и аналого-цифровые преобразователи (АЦП); ко второй группе — устройства коммутации цифровых сигналов (УКЦС) и устройства приема цифровой информации (УПЦИ); формирование и передача от УВК управляющих воздействий в виде двухпозиционных, цифровых и аналоговых сигналов к исполнительным механизмам осуществляется с помощью коммутатора цифровых управляющих сигналов (КЦУС) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Особое место занимает блок внешних прерываний процессора по сигналам от датчиков и от таймера (ТМР), формирующего сигналы для организации различных циклов обработки информации и управления объектом. Пульт оператора-технолога (ПОТ) связывается с УВК техническими средствами приема и передачи информации. Отдельные устройства могут подключаться через соответствующий интерфейс непосредственно к УВК.

При разработке УСО конкретной АСУ ТП следует определить, в какой мере функции устройств связи обеспечиваются серийно выпускаемыми техническими средствами, а в случае необходимости сформулировать требования для разработки специализированных устройств.

#### Устройства ввода аналоговых сигналов

Подсистемы аналогового ввода информации в УВК выполняют следующие функции:

- приема аналоговых сигналов;
- нормализации и фильтрации аналоговых сигналов;
- коммутации аналоговых сигналов по адресам, получаемым от вычислительного устройства;
- преобразования аналоговых сигналов в цифровой код;

выдачи полученного цифрового кода в вычислительное устройство.

В соответствии с выполняемыми функциями оборудование подсистем ввода аналоговых сигналов классифицируется следующим образом:

Переходные устройства — клеммные колодки, кабельные разъемы или специальное оборудование для каждого типа сигнала.

Устройства нормализации — устройства, осуществляющие любой вид модификации сигнала, кроме усиления. В качестве примеров можно назвать фильтрацию, смещение уровня, линейную или нелинейную компенсацию, преобразование тока в напряжение.

Устройства коммутации — осуществляют операцию последовательного подключения каждого отдельного канала, что позволяет аналого-цифровому преобразователю обслуживать несколько входных сигналов. Коммутаторы обычно классифицируют по уровням сигналов и быстродействию.

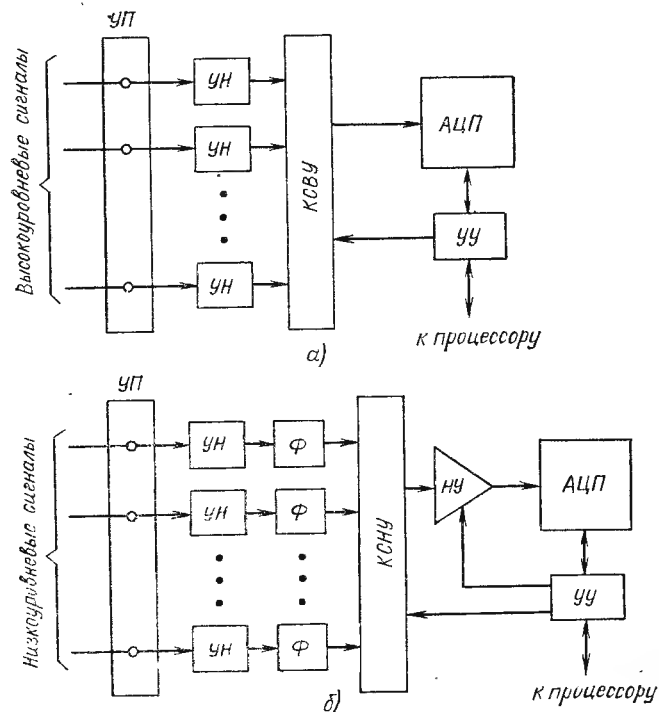


Рис. 6.22. Подсистема аналогового ввода сигналов высокого (а) и низкого (б) уровней.

Устройства усиления — применяются для усиления сигналов низкого уровня в том случае, если аналого-цифровой преобразователь работает в диапазоне сигналов высокого уровня (5 или 10 В). Усилители, выполняющие эти функции, называют усилителями сигналов низкого уровня.

Аналого-цифровые преобразователи — обеспечивают цифровое представление аналогового сигнала. Большинство преобразователей имеют шкалы входов 5 или 10 В. Реализация описанных функций позволяет получить аналоговые подсистемы самого различного назначения.

Вариант подсистемы аналогового входа для сигналов высокого уровня представлен на рис. 6.22, а. Ввод осуществляется через переходное устройство (УП), затем сигналы проходят через устройства нормализации (УН) (в том случае, если это необходимо) и поступают в коммутатор сигналов высокого уровня (КСВУ). Канал коммутации замыкается по команде устройства управления (УУ). Выход коммутатора подсоединяется к аналого-

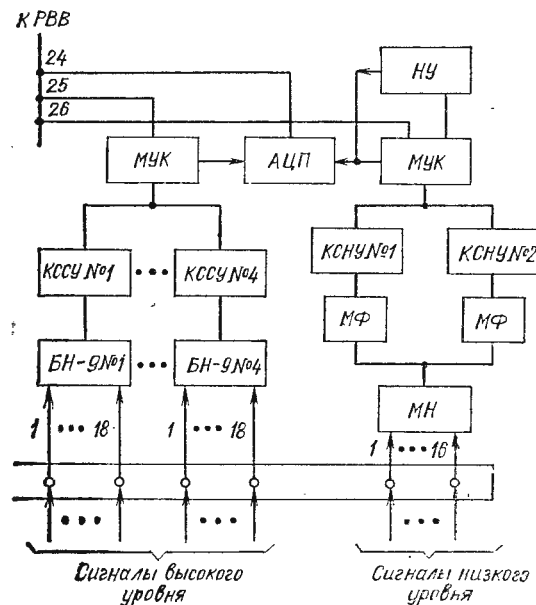


Рис. 6.23. Реализация подсистемы аналогового ввода на базе модулей АСВТ-М.



цифровому преобразователю (АЦП), в котором осуществляется преобразование сигналов в двоичный код. Используемый тип преобразователя зависит от требований, предъявляемых к быстродействию и разрешающей способности системы.

Конфигурация подсистемы для сигналов низкого уровня показана на рис. 6.22,б. Подсистема аналогична предыдущей, но содержит усилитель сигналов низкого уровня (НУ). Коммутатор сигналов низкого уровня (КСНУ) в отличие от КСВУ требует защиты от наводок и шумов, поэтому после устройства нормализации (УН), как правило, ставятся фильтры (Ф).

Пример компоновки подсистемы аналогового ввода информации для сигналов высокого и низкого уровней на базе блоков и модулей АСВТ-М приведен на рис. 6.23.

### Устройства ввода-вывода дискретной информации

Сопряжение вычислительного устройства с источниками дискретной информации и выдачу цифровых сигналов в систему отображения и на объект управления обеспечивают подсистемы цифрового ввода и вывода.

Устройства цифрового ввода позволяют определять состояние контакта, подсчитывать число импульсов и определять длительность импульсных сигналов, которые вырабатываются технологическим процессом или измерительными устройствами.

Устройства цифрового вывода используют электронные или электромеханические ключи для управления исполнительными механизмами или индикаторами технологического процесса. Устройства могут содержать также импульсные выходные схемы, которые вырабатывают либо заданное число импульсов, либо импульсный сигнал переменной длительности.

В настоящее время наблюдается заметный рост цифровых вводов и выводов по сравнению с аналоговыми. Это обусловлено тем, что управление технологическим процессом и его приборное оснащение осуществляется преимущественно в цифровой форме, даже если сам процесс является непрерывным по своей природе. Цифровое управление существенно упрощает обработку сигналов и снижает характерные для аналогового управления проблемы, связанные с помехоустойчивостью и другими воп-

росами точности. Конфигурации подсистем цифрового ввода и вывода представлены на рис. 6.24,а,б.

В устройствах связи с объектом в системе АСВТ-М предусмотрены устройства, осуществляющие ввод информации от двухпозиционных, кодовых и число-импульсных датчиков. Источниками сигналов могут быть контакты реле и клавиши, тумблеры, переключатели, делители напряжения, логические элементы и т. п. Для приема и преобразования дискретных сигналов в АСВТ-М используются: модули ввода дискретной информации (МВВДИ), модули ввода инициативных сигналов (МВВИС) и модули ввода числоимпульсных сигналов (МВВЧИС).

Модуль ввода дискретной информации имеет 16 вхо-

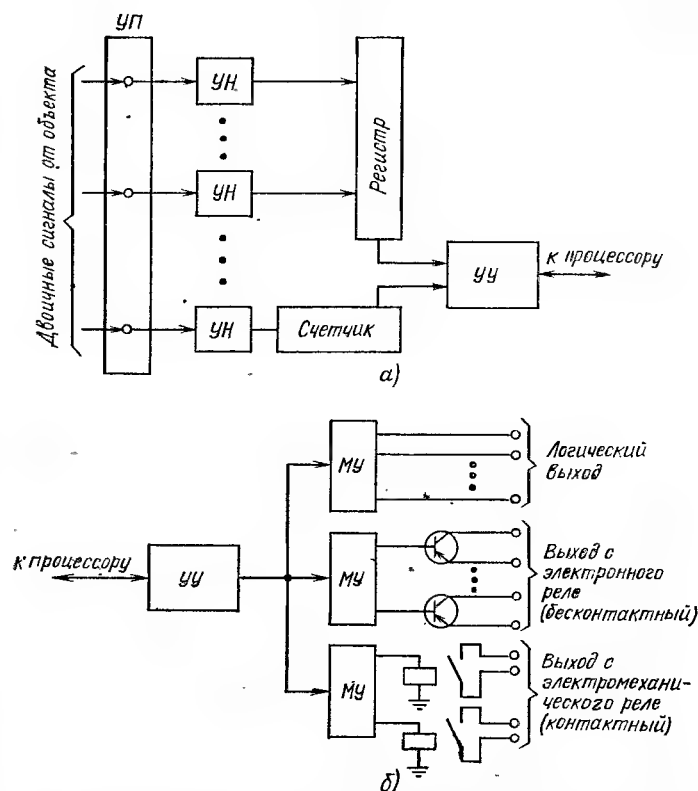


Рис. 6.24. Подсистема дискретного ввода информации (а) и подсистема дискретного вывода (б).

дов для приема двухпозиционных сигналов и выдает в вычислительное устройство по запросу от него шестнадцатиразрядный код, разряды которого поставлены во взаимнооднозначное соответствие входам.

Модуль ввода инициативных сигналов содержит восемь двухпозиционных входов и соответственно выдает 8-разрядный двоичный код. Модуль используется для ввода сигналов, требующих быстрой реакции системы (запросов на обслуживание, аварийных и предаварийных сигналов и пр.).

Модуль ввода числоимпульсных сигналов имеет один двухпозиционный вход, считает поступающие по нему сигналы (импульсы) и результат подсчета выдает в вычислительное устройство УВК по его запросу (например, счетчик электроэнергии).

Все модификации рассмотренных модулей выполнены на плате типа интерфейсной карты и имеют выход на сопротивление 2К. Для подключения большого числа модулей предусмотрен модуль группового управления вводом дискретной информации (МГУ), рассчитанный на 22 места в любом сочетании.

Пример реализации подсистемы ввода дискретной информации на модулях АСВТ-М представлен на рис. 6.25, а.

Подсистемы вывода дискретной информации строятся из набора бесконтактных модулей кодового управления выводом дискретной информации (МКУБ), набора контактных модулей кодового управления (МКУК) и модулей управления выводом дискретной информации (МУВ).

Модули кодового управления бесконтактные получают от вычислительного устройства двоичный код, запоминают его до тех пор, пока не будет получен новый код, и выдают на выход двухпозиционные сигналы, соответствующие значениям разрядов этого кода. На выходе модулей размещены бесконтактные ключи.

Модули кодового управления контактные используются для выдачи сигналов на исполнительные механизмы, которые нельзя подключить непосредственно к бесконтактным модулям (например, из-за использования переменной мощности или из-за использования переменного тока, а также для выполнения некоторых логических преобразований в группах выданных дискретных сигналов. Включаются модули между выходами

бесконтактных модулей и исполнительными устройствами. Модули имеют две группы по 10 выходов и получают от бесконтактных модулей 12-разрядный код. Два разряда этого кода используются для выбора группы выходов, а 10 разрядов выдаются на выбранную группу выходов.

Кроме названных модулей имеются модули импульсного управления (МИУ) и модули позиционного управления (МПУ).

Модуль импульсного управления имеет всего пять выходов. Сигнал на выходе сохраняется в течение фиксированного промежутка времени, устанавливаемого для каждого выхода отдельно в пределах от 1 мкс до 6,3 с, путем подключения соответствующей емкости. Модули импульсного управления используются для подключения исполнительных механизмов, требующих для

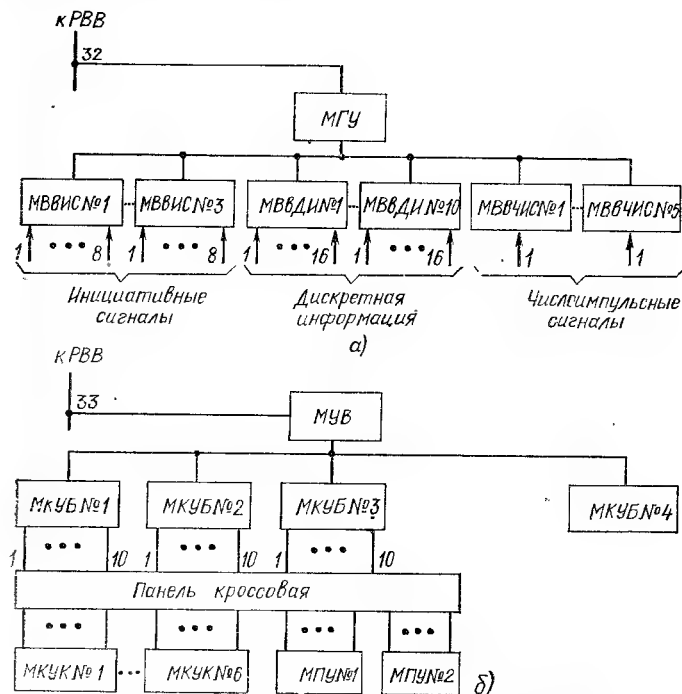


Рис. 6.25. Реализация дискретных подсистем на базе модулей АСВТ-М.

а — для ввода дискретной информации; б — для вывода дискретных результатов.

управления не потенциальных, а импульсных сигналов. Следует заметить, что импульсные сигналы могут выдаваться и с помощью бесконтактных модулей кодового управления, но тогда на программу возлагается обязанность снятия выданного сигнала через требуемый промежуток времени. Бесконтактные модули выполняются на платах типа интерфейсной карты с выходом на сопряжение 2К и могут устанавливаться в процессоре, расширителе ввода-вывода, или разветвителе сопряжения.

Модуль позиционного управления является контактным блоком. Он получает от бесконтактного кодового модуля шестиразрядный двоичный код, в котором два разряда указывают группу, а четыре разряда — номер выхода в группе. Одновременно при этом может существовать сигнал не более чем на одном выходе в каждой группе. Модули позиционного управления позволяют управлять печатающими машинками, групповыми выносными коммутаторами, а также позиционными исполнительными механизмами. Один из вариантов конфигурации подсистемы вывода дискретной информации представлен на рис. 6.25,б.

При большом числе модулей вывода дискретной информации используется модуль группового управления выводом (МУВ), к которому можно подключать до 16 бесконтактных модулей типа МКУБ и МИУ.

### *Организация связи с оперативным персоналом*

На современном уровне автоматизации оператор-технолог должен получать исчерпывающую информацию о протекании технологического процесса и состоянии оборудования, а также иметь возможность воздействовать на объект управления.

Устройства, с помощью которых оператор-технолог осуществляет перечисленные операции, разнообразны: мнемосхемы, табло, пульты управления, сигнализирующие щиты, экранные пульты и печатающие устройства.

В последнее время, особенно на ТЭС и АЭС используется автоматизация дискретных операций на базе функционально-группового управления (ФГУ). Поэтому помимо названного оборудования у оператора появляются органы управления устройствами ФГУ, а также устройствами, контролирующими их работу.

Средства представления информации и устройства, позволяющие оператору воздействовать на процесс, как правило, централизуются на пульте оператора-технолога. Все реализуемые с помощью пульта функции должны выполняться в реальном масштабе времени и в форме, удобной для работы оператора (как правило, это десятичная форма). При этом язык взаимодействия оператора с системой содержит номера операций или команд, выполняемых УВК, или выводимых на пульт параметров, показателей и коэффициентов. Для представления значений параметров может использоваться цифровая индикация, выполняемая на десятичных индикаторах. Здесь же может быть представлен и номер параметра, соответствующий его адресу.

Совместная работа оператора и управляющего вычислительного комплекса обычно ведется в режиме «запрос — ответ». Это означает, что после выдачи задания оператор должен дожидаться ответа от УВК и лишь после этого может давать новое задание. Используя вводимые с пульта специальные команды, оператор может задавать периоды вызова на цифровую индикацию параметров, а также устанавливать периоды регистрации периодической печати, включить тот или иной параметр в число регистрируемых или исключить его из этого списка.

Удобным средством связи для оперативного персонала являются экранные пульты на базе дисплеев. Общение оператора-технолога с управляющим комплексом упрощается, так как информация о параметрах и другие данные представляются полным текстом.

Различают алфавитно-цифровые и графические дисплеи.

К числу алфавитно-цифровых дисплеев, выпускаемых отечественной промышленностью, относятся:

Станция индикации данных СИД-1000, в комплект которой входят индикатор на базе телевизионной приемной трубки 35ЛК7Б, клавиатура, блок управления с буферным запоминающим устройством емкостью 1024 байта. Клавиатура содержит 96 буквенно-цифровых знаков. Общее число клавиш — 94.

Алфавитно-цифровой видеотерминал «Видеотоп-340» подключается к вычислительному комплексу с помощью двух дуплексных регистров и кабеля длиной до 15 м.

Таблица 6.7. Технические характеристики дисплеев

| Наименование                                | Марка дисплея     |                  |                  |                  |
|---------------------------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                             | СИД-1000          | „Видеотон-340“   | ДМ-500           | ДМ-2000          |
| Размеры изображения, мм                     | 160×192           | 140×200          | 100×140          | 180×250          |
| Количество строк                            | 16                | 16               | 16               | 24               |
| Количество символов в строке                | 64                | 80               | 32               | 80               |
| Количество символов на экране               | 1024              | 1280             | 512              | 1920             |
| Максимальная скорость ввода-вывода, симв./с | 30 000            | 10 000           | 30 000           | 30 000           |
| Габаритные размеры, мм                      | 805×600×<br>×1120 | 661×390×<br>×352 | 390×370×<br>×720 | 480×455×<br>×720 |

Дисплейные модули ДМ-500, ДМ-2000 подключаются к УВК с помощью модулей быстрой передачи данных, что позволяет значительно увеличить скорость ввода-вывода информации. Основные технические характеристики рассмотренных дисплеев приведены в табл. 6.7.

Станция индикации графических данных (СИГДА) используется для представления графической информации. Станция обеспечивает вывод на экран алфавитно-цифровых сигналов и графических изображений, построенных из точек, отрезков прямых дуг и окружностей.

Размеры рабочего поля экрана 240×240 мм, максимальное число символов на экране 2000, разрешающая способность 1024×1024 точек. Габаритные размеры 500×450×670 мм. Станция подключается к УВК с помощью двух интерфейсных блоков, занимающих два вывода на сопряжение 2К. Максимальная длина кабеля между устройством и УВК до 20 м.

Большой интерес представляют цветные графические дисплеи. Использование различных цветов при представлении информации на экране дисплея позволяет повысить восприимчивость оператора к потоку информации.

Терминал графический цветной (ЦГТ) — предназначен для визуального представления графической алфавитно-цифровой информации на экране цветного телевизора. Позволяет выводить на экран любое

изображение, составленное из точек: 320 по горизонтали, 270 по вертикали. На каждую точку задаются две градации яркости («светить» — «не светить»). На группу из 8 точек (4 по горизонтали, 2 по вертикали) задаются три признака цвета — красный, синий, зеленый и признак мерцания.

Изображение хранится в буферной памяти. Размер изображения 350×450 мм, емкость экрана 86 400 точек.

Устройство отображения информации «Орион», разработанное ЦНИИКА, с целевым назначением для АСУ ТП ТЭС и АЭС. Устройство рассчитано на работу с управляющим вычислительным комплексом и используется в составе оборудования рабочего места оператора для отображения на экране цветного телевизора разнообразной технологической информации в виде мнемосхем, таблиц, графиков значений параметров, картограмм, текстов советов и рекомендаций оперативному персоналу.

Отличительная особенность устройства заключается в том, что изображение на экране формируется путем наложения двух составляющих — статической и динамической информации. Статическая информация хранится в виде рисунков (слайдов), на которые наносятся все неизменяемые элементы изображения (чертеж мнемосхемы, таблицы и пр.), и отображается голубым цветом на темном фоне. Динамическая символьная информация — числовые значения параметров, положения регулирующих органов, тексты советов, элементы графиков — поступает в устройство из УВК с указанием места расположения символов на экране и отображается в трех цветах (зеленый, красный, фиолетовый).

В состав устройства «Орион» входят телевизионный индикатор, блок формирования статической информации, блок клавиатуры, блок связи с УВК, буферное запоминающее устройство, генератор символов динамической информации и устройство управления.

Блок формирования статической информации содержит диск с рисунками, схему управления и передающую телевизионную камеру, которая формирует телевизионный видеосигнал изображения выбранного рисунка. Код номера рисунка поступает из блока клавиатуры.

Основные технические характеристики устройства «Орион» приведены в табл. 6.8.

Кроме дисплеев оператор-технолог имеет большие возможности использования различных устройств печат-

Таблица 6.8. Технические характеристики устройства „Орион“

| Наименование                                    | Характеристика                            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Индикатор                                       | Цветной телевизионный приемник УЛПТЦ-59-П |
| Передающая камера                               | КТП-39                                    |
| Число знако-мест                                | 952 (28 строк по 34 знако-места)          |
| Количество рисунков со статической информацией  | 32                                        |
| Объем буферного ЗУ                              | 256 18-разрядных слов                     |
| Максимальное расстояние от индикатора до УВК, м | 150                                       |

ти. Наибольший интерес представляют знакосинтезирующие устройства УПЗ, ДЗМ, позволяющие осуществлять вывод информации из дисплейных модулей ДМ-500 и ДМ-2000.

Наряду с этим следует отметить устройства печати с клавиатурой УПК; устройства параллельной (быстрой) печати УБП и др. Технические характеристики перечисленных печатающих устройств приведены в табл. 6.9.

Таблица 6.9. Технические характеристики устройств печати

| Наименование                                                           | Тип устройства печати             |                                      |             |              |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------|
|                                                                        | УПК                               | УПЗ                                  | ДЗМ         | УБП          |
| Используемый механизм                                                  | „Кот-сул-260“                     | МП-4                                 | ДЗМ-180     | ЕС-7184А     |
| Принцип печати                                                         | Последовательный, знакопечатающий | Последовательный, знакосинтезирующий |             | Параллельный |
| Максимальная скорость печати, зн/с                                     | 10                                | 100                                  | 180         | 300          |
| Число копий                                                            | До 5                              | 2                                    | 4           | До 5         |
| Максимальная длина кабеля между устройством и интерфейсными блоками, м | 10                                | 10                                   | 10          | 5            |
| Ширина бланка, мм                                                      | 90—280                            | 420                                  | 100—420     | 100—250      |
| Габаритные размеры с подставкой, мм                                    | 1250×980×650                      | 675×1010×650                         | 700×940×440 | 612×1000×620 |

## 6.8. Структуры АСУ ТП ТЭС и АЭС с использованием управляющих вычислительных комплексов

Для обеспечения нормального функционирования мощных блоков тепловых и атомных электрических станций необходимо контролировать более 1000 параметров, из них свыше 100 должны иметь высоконадежную автоматическую стабилизацию. Особенно важными параметрами являются: частота вращения вала турбины; давление и температура пара на выходе котла и перед турбиной; давление в конденсаторе турбины; давление, коэффициент избытка воздуха и наличие факела в топке котла; распределение тепловыделения и плотности нейтронов и пр. Для управления блоком используется несколько сот регулирующих органов. Высокая стоимость оборудования, резкое увеличение приведенных затрат при авариях на блоках требуют исключительно надежной работы автоматики.

Совершенствование технологического оборудования повлекло за собой отказ от традиционных принципов контроля и управления. Новый подход к управлению станций в целом и энергоблоками в частности заключается в широком использовании вычислительной техники.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами тепловых и атомных электростанций (АСУ ТП ТЭС и АЭС) являются составной частью иерархической структуры системы автоматизированного управления отраслью (АСУ «Энергия») и реализуют функции по управлению ТЭС и АЭС и связи их с системами управления более высокого уровня (АСУ производственного энергетического объединения, АСУ энергосистемы). В основе АСУ ТП ТЭС и АЭС лежат современные технические решения: унифицированный сигнал постоянного тока; функциональное групповое управление; современные средства отображения информации (в том числе дисплеи черно-белого и цветного изображения); новые поколения средств регулирования и вычислительной техники.

Структура АСУ ТП ТЭС и АЭС соответствует иерархической структуре электростанции как объекта управления. Верхний уровень АСУ ТП содержит общестанционную часть, на нижнем уровне находятся системы управления отдельными технологическими установками.

В пределах этих систем организуются подчиненные системы управления технологическими узлами — функциональными группами, подгруппами и т. д. вплоть до индивидуальных исполнительных механизмов. АСУ ТП энергоблоков находятся на уровне систем управления технологическими установками, полностью обеспечивая надежное и экономичное управление энергоблоками во всех эксплуатационных режимах и реализуют как информационные, так и управляющие функции.

К числу информационных функций АСУ ТП энергоблока относятся:

контроль параметров и определение показателей, характеризующих текущее состояние технологического оборудования энергоблока;

расчет отклонений текущих показателей от нормативных;

регистрация аварийных ситуаций на энергоблоке с фиксацией изменения важнейших параметров в доаварийной ситуации;

расчет и анализ технико-экономических показателей отдельных установок и по энергоблоку в целом за оперативные интервалы времени;

расчет оптимальных показателей ведения технологического процесса;

расчет характеристик относительных приростов в темпе процесса и передача исходных данных в общестанционную систему для реализации функций оптимального распределения между энергоблоками активной мощности;

представление информации оперативному персоналу по месту и на блочном щите управления (БЩУ);

диагностика состояния технологического оборудования и АСУ ТП.

К числу управляющих функций АСУ ТП энергоблока, реализуемых УВК, относятся:

автоматическое регулирование технологических параметров по заданным законам путем непосредственного управления (НЦУ);

вычисление данных для оптимизации отдельных технологических процессов энергоблока и выдача их в виде совета оператору-технологу (работа УВК в режиме советчика) или вывод управляющих воздействий на задатчики локальных автоматических регуляторов (супервизорное управление);

дискретное управление пусками и остановами технологического оборудования.

Кроме функций, выполняемых с применением УВК, следует назвать управляющие функции, реализуемые на других технических средствах:

дистанционное управление приводами арматуры и регуляторами с БЩУ;

автоматическое регулирование с использованием локальных регуляторов;

защиты и блокировки;

функционально-групповое управление определенных технологических узлов по заранее заданным программам.

### *Структура и функции АСУ ТП ТЭС и АЭС*

АСУ ТП ТЭС и АЭС следует рассматривать как комплексные системы, состоящие из функциональной и обеспечивающей частей с составляющими, представленными на рис. 6.26. Функции АСУ ТП энергоблоков были рассмотрены выше. Функции АСУ ТП ТЭС и АЭС по вспомогательному и общестанционному оборудованию в определенной степени аналогичны функциям АСУ ТП энергоблоков, поэтому здесь основное внимание уделено общестанционным функциям.

В последнее время в энергосистемах широко проводится централизация производственно-хозяйственного управления (централизуется ремонт электрооборудования, бухгалтерии, автотранспорт, объединяются органы материально-технического снабжения и т. д.). В связи с этим общестанционные функции АСУ ТП ТЭС и АЭС все больше сводятся к задачам оперативно-диспетчерского управления, а также к обработке и сжатию информации для АСУ энергосистемы. К числу этих задач относятся:

сбор и обработка информации от аналоговых и дискретных датчиков о состоянии и параметрах главной электрической схемы станции и общестанционного технологического оборудования;

отображение в центральном щите управления (ЦЩУ) на многомасштабных, цифровых и аналоговых индикаторах, ЭЛН и других технических средствах основной оперативной информации о работе энергоблоков, о состоянии параметров электрических схем и общестанционных технологических параметров;

регистрация первичных и расчетных параметров для электростанции в целом — автоматическое ведение суточной ведомости;

расчеты, связанные с обеспечением надежности эксплуатации, регистрация аварийных ситуаций, включая предысторию и порядок срабатывания защит и отключения выключателей главной электрической схемы, предупреждение и ликвидация аварийных ситуаций;

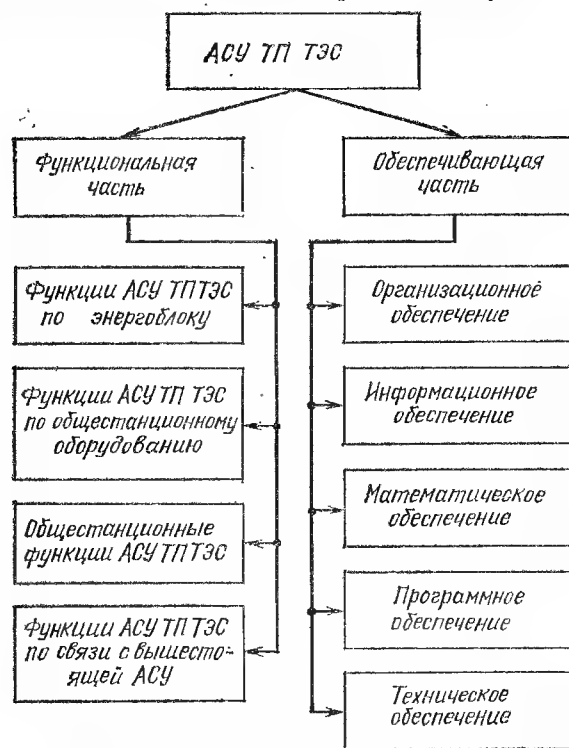


Рис. 6.26. Структура АСУ ТП ТЭС.

расчет технико-экономических показателей электростанции в целом за отчетные периоды времени (смена, сутки, месяц), определение нормативных величин различных видов потерь и анализ отклонений фактических потерь от нормальных значений;

расчет суммарной электрической характеристики электростанции для передачи ее в АСУ высших уровней с заданными интервалами времени;

расчет оптимальных режимов, в том числе расчет наивыгоднейшего распределения нагрузки между энергоблоками;

сбор, обработка и анализ оперативных заявок на вывод из работы основного и вспомогательного оборудования;

управление передвижением топлива по направлениям, связывающим разгрузочное устройство, склады, и непрерывный учет наличного топлива;

оптимизация, программирование и контроль оперативных переключений в электрических схемах в нормальных и аварийных условиях;

взаимодействие с функциональными подсистемами АСУ ТП по энергоблокам и по общестанционному оборудованию.

В состав функций АСУ ТП ТЭС и АЭС по иерархической связи входят обмен оперативно-диспетчерской информацией с вышестоящей АСУ и выполнение ее заданий. Обеспечивающая часть АСУ ТП ТЭС и АЭС (см. рис. 6.26) включает в себя мероприятия, необходимые для четкого выполнения рассмотренных функциональных задач.

Организационное обеспечение содержит совокупность правил и предписаний, обеспечивающих требуемое взаимодействие оперативного персонала с комплексом технических средств и между собой во время работы системы.

Информационное обеспечение отражает направления и характеристики потоков информации в системе. В первую очередь информация, циркулирующая в АСУ ТП, подразделяется на входную, выходную и промежуточную. К входной относится информация, автоматически поступающая от энергоблоков, общестанционного оборудования, а также от АСУ верхнего уровня и вводимая вручную. К выходной относится управляющая информация, поступающая в виде команд к объектам управления и справочная информация, представляемая руководящему составу станции и в АСУ высших уровней. К промежуточной относится информация, циркулирующая и хранящаяся на отдельных этапах обработки. По виду сигналов информация делится на аналоговую и дискретную.

Математическое обеспечение (МО) представляет собой совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых для решения за-

дач и обработки информации с применением вычислительной техники в рассматриваемой АСУ ТП.

Программное обеспечение (ПО) включает совокупность программ, обеспечивающих функционирование комплекса технических средств и выполнение всех функций АСУ ТП. Программное обеспечение принято разделять на две части: общее программное обеспечение, поставляемое в комплекте с УВК, и специальное программное обеспечение, охватывающее множество программ, разрабатываемых при создании конкретной АСУ ТП.

Техническое обеспечение представляет собой совокупность устройств, обеспечивающих реализацию процессов сбора, передачи, обработки, хранения и использования информации в АСУ ТП ТЭС и АЭС и связь ее с АСУ высшего уровня.

Применяемые в АСУ ТП ТЭС и АЭС управляющие вычислительные комплексы должны иметь широкую номенклатуру внешних устройств (ввода-вывода информации, связи с объектом, отображения информации, межсистемной связи) и систему приоритетного прерывания, позволяющую реализовать большое число различных программ в определенной очередности с учетом их значимости.

Для АСУ ТП ТЭС и АЭС в качестве основных средств вычислительной техники используются системы

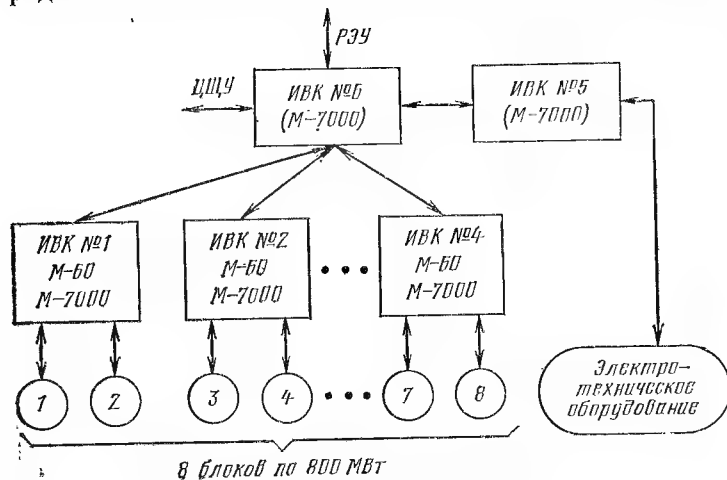


Рис. 6.27. АСУ ТП ТЭС мощностью  $8 \times 800$  МВт.

«Комплекс — АСВТ», «Комплекс-УРАН» с применением процессоров М-6000 и М-7000 с дальнейшим переходом на машины серии СМ ЭВМ.

Современные электростанции в зависимости от технических средств, используемых для автоматизации, можно разделить на:

оснащенные только традиционными средствами контроля и управления на энергоблоках;

оснащенные информационно-вычислительными системами ИВ-500 на энергоблоках;

оснащенные управляющими вычислительными системами «Комплекс-АСВТ» или «Комплекс-УРАН».

При этом могут быть варианты структуры:

вычислительный комплекс на электростанции в целом при отсутствии средств вычислительной техники на отдельных энергоблоках;

центральный вычислительный комплекс при наличии блочных информационно-вычислительных систем ИВ-500;

центральный вычислительный комплекс при наличии управляющих вычислительных систем «Комплекс-АСВТ» или «Комплекс-УРАН», обслуживающий один блок или группу блоков. Последний вариант структуры характерен для современных ТЭС с мощными блоками по 300—800 МВт (рис. 6.27).

Одна из первых АСУ ТП ТЭС (разработка ЦНИИКА и Теплоэлектропроекта) введена в промышленную эксплуатацию на Змиевской ГРЭС Харьковэнерго в 1974 г. Основой этой АСУ является разработанная и изготовленная ЦНИИКА для двух блоков 300 МВт управляющая вычислительная система «Комплекс», в которую подается информация от остальных восьми блоков для расчетов удельного расхода топлива, нормативных показателей и пережогов топлива, определения энергетических характеристик и выдачи рекомендаций по оптимальному распределению нагрузок между энергоблоками, расчета характеристик удельных приростов ТЭС для выдачи их в АСУ Харьковэнерго.

На основе этой разработки и опыта создания АСУ ТП Буртинской и Молдавской ГРЭС на базе УВК М-7000 (с дальнейшим переходом на УВК СМ ЭВМ) создается типовая АСУ ТП ТЭС. Внедрение головной системы осуществляется на Запорожской ГРЭС.

*Технические средства для реализации подсистем АСУ ТП ТЭС и АЭС на уровне энергоблоков*

а) Централизованный контроль с использованием информационно-вычислительной машины ИВ-500

Машина ИВ-500 (рис. 6.28) построена по агрегатному принципу, позволяющему компоновать модификации,



различающиеся как по числу точек контроля, так и по функциям. В качестве измерительных преобразователей используются термоэлектрические термометры, термометры сопротивления и дифференциально-трансформаторные датчики.

Измерительные преобразователи ИП подключаются к устройствам коммутации УК (до 40 различных преобразователей к одному УК, всего в машине может быть до 16 УК).

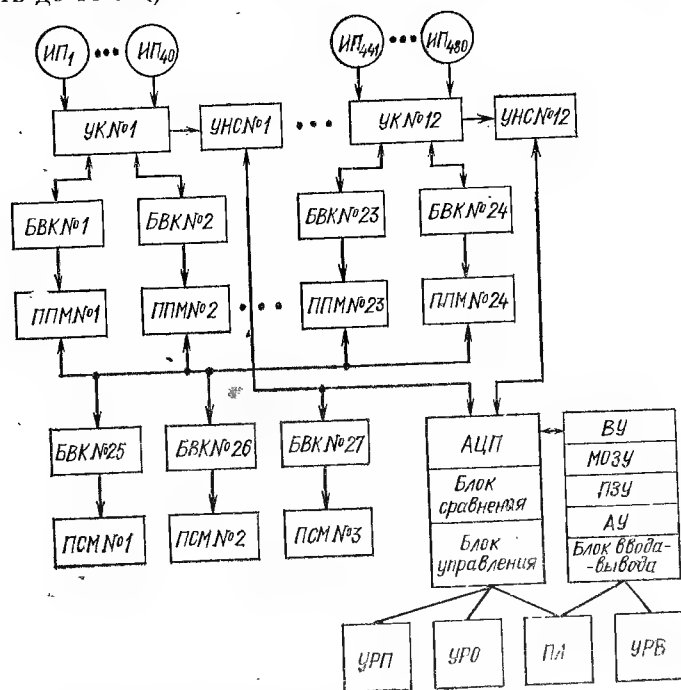


Рис. 6.28. Структурная схема ИВК ИВ-500.

В устройствах коммутации осуществляется коммутация измерительных преобразователей, температурная компенсация свободных концов термоэлектрических термометров, масштабирование и преобразование сигналов термометров сопротивления в напряжение постоянного тока. Далее сигналы поступают в устройство нормализации и сигнализации УНС, где преобразуются в стандартный уровень 0—10 В. Преобразование сигнала в цифровой код осуществляется в аналого-цифровом пре-

образователе АЦП. С выхода АЦП информация в цифровой форме поступает на устройство периодической регистрации параметров УРП и устройство регистрации отклонений за уставки параметров УРО. Контроль в цифровой форме осуществляется через информационный экран ИЭ. Контроль по вызову параметров в аналоговой форме выполняется с помощью десятищальных показывающих универсальных приборов ППМ и вызывных самопишущих приборов ПСМ с вызовом через клавишные блоки вызова БВК.

В машине ИВ-500 имеется вычислительное устройство ВУ для расчета технико-экономических показателей, состоящее из магнитного оперативного запоминающего устройства МОЗУ, постоянного запоминающего устройства ПЗУ и арифметического устройства АУ. В вычислительное устройство вводится до 100 параметров, которые накапливаются и приводятся к средним величинам в течение 60 мин. В конце цикла производится вычисление. Коэффициенты, изменяющиеся в процессе эксплуатации, могут быть введены вручную в любой момент времени. Результаты вычислений регистрируются электрической печатающей машинкой УРВ. Имеется возможность вывода результатов вычислений на перфокарный лист для механизации обработки и анализа.

Таким образом, информацию об экономичности работы блока и всех отклонениях от расчетных величин оператор получает регулярно, что позволяет ему оперативно вносить коррективы, добиваясь оптимального ведения режима. Скорость периодической регистрации — 2 точки в секунду, цикличность регистрации — 30, 60, 120 мин и по вызову оператора.

Машина ИВ-500 установлена на целом ряде блоков. Машина ИВ-500А применялась только для блоков АЭС и отличается раздельным выполнением сигнального табло и кнопки вызова параметра. Модификация ИВ-500У с увеличенным числом входных коммутаторов предназначена для организации контроля на двух блоках мощностью 300 МВт.

Машины моделей ИВ-500УМ и ИВ-500МА рассчитаны на большее число входов (до 1440) и имеют более мощное вычислительное устройство. Эти машины применяются для блоков 500 МВт и для блоков АЭС мощностью 440 МВт.

б) Автоматизированная система управления мощными энергоблоками («Комплекс-АСВТ»)

Для мощных энергоблоков тепловых электростанций ЦНИИКА в сотрудничестве с организациями Минэнерго СССР создана автоматизированная система управления (АСУ) «Комплекс-АСВТ», структурная схема которой приведена на рис. 6.29.

В состав системы входят средства контроля и сигнализации, автоматические регуляторы, устройства логического и дистанционного управления, защиты, средства отображения информации, связи оператора с объектом управления (оперативные щиты и пульты управления), управляющий вычислительный комплекс (УВК).

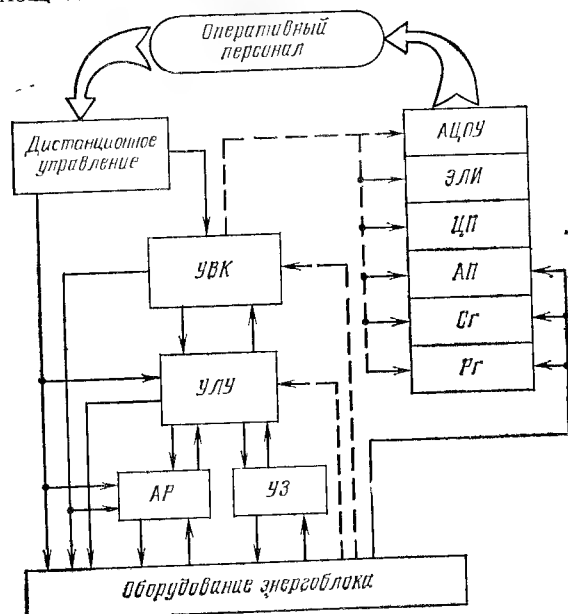


Рис. 6.29. Структурная схема АСУ «Комплекс-АСВТ».

Системы автоматического регулирования, логического управления и блокировок строятся в основном на локальных средствах, в соответствии с типовыми техническими решениями, принятыми для энергоблоков.

Для удобства выполнения операций по дистанционному управлению и исключения ошибочных действий

персонала большинство исполнительных элементов системы управления энергоблоком (механизмы, задвижки, регулирующие органы) объединены в функциональные группы, предназначенные для выполнения единой технологической функции.

Управление функциональными группами организуется по иерархической структуре с выделением устройств нескольких уровней (рис. 6.30).

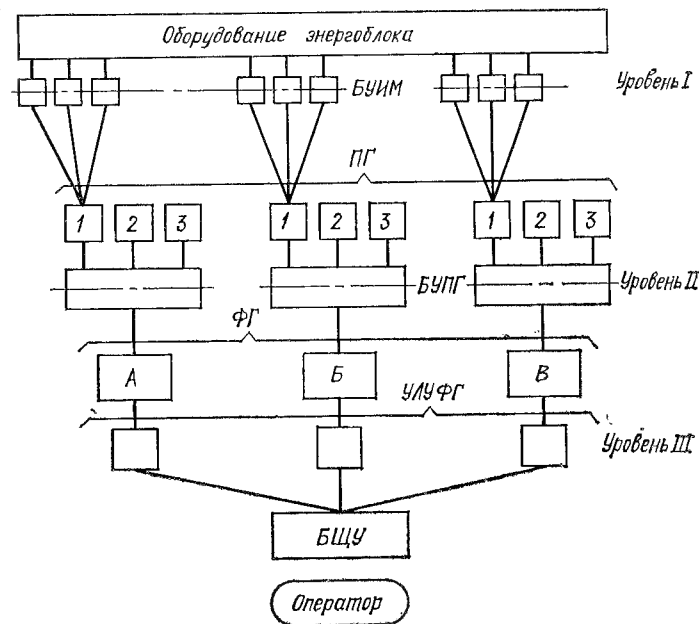


Рис. 6.30. Структурная схема функционально-группового управления.

К устройствам первого (нижнего) уровня относятся блоки индивидуального управления исполнительными механизмами (БУИМ). Устройства второго уровня объединяют подгруппы (ПГ) и блоки управления подгруппами (БУПГ), взаимодействие которых всегда определяется единой жесткой программой с двумя возможными состояниями. Устройства третьего уровня осуществляют зависящее от режима оборудования многофункциональное управление с помощью функциональных групп (ФГ) и устройств логического управления функциональными группами (УЛУ ФГ).

Количество необходимых технических средств в целом иллюстрируется на примере системы управления блоком 800 МВт. Для управления таким блоком используется информация более чем от 1500 датчиков с унифицированным выходом, измеряющих давление, разрежение, перепад давления, уровни от 800 термоэлектрических термометров и термометров сопротивления с преобразователями; от более чем 2000 двухпозиционных органов, механизмов и устройств. Система регулирования включает более 120 контуров и комплектуется примерно из 1000 регулирующих блоков аппаратуры ГСП типа «Каскад» или АКЭСР. Энергоблок такой мощности оснащается 80 устройствами технологических защит, для размещения которых требуется 15 шкафов. Устройства управления 20 технологическими функциональными группами оборудования располагаются в 50 шкафах.

Центральной частью АСУ является управляющий вычислительный комплекс, функциональные возможности которого представлены на рис. 6.31.

Централизованный контроль по вызову осуществляется на цифровых приборах ЦП, графических построителях ГП и цифровых устройствах ЦПУ, на которых могут быть представлены любые параметры, подключенные ко входу УВК или вычисленные в нем.

Перспективной на мощных блоках является система централизованного предметно-группового контроля с использованием цветного электронно-лучевого индикатора (ЭЛИ) «Орион». На его экран могут вызываться участки мнемосхем, на которых высвечиваются текущие значения измеряемых и вычисленных параметров, индицируются степень открытия регулирующих органов, состояние арматуры и пр. Предусматривается вывод на экран ЭЛИ графиков изменения во времени ряда оговоренных заранее параметров и графиков некоторых зависимостей, вычисляемых УВК.

Функция регистрации аварийных ситуаций предназначена для анализа причин возникновения и характера развития аварий. Сбор и обновление накопленных данных осуществляется периодически. В памяти УВК хранится информация о событиях и значениях параметров за интервал времени  $T_1$  от момента последнего опроса. В каждом новом цикле обновления данных стирается информация, вышедшая за пределы интервала  $T_1$  и вместо нее заносится вновь полученная. Величина интервала  $T_1$  — до 10 мин. Фиксация аварийного режима начинается сразу после возникновения сигнала, классифицируемого УВК как признак аварии. В этом режиме прекращается стирание старой накопленной информации и фиксируются данные об аварийном режиме в течение времени  $T_2 > T_1$  от начала аварии. По прошествии времени  $T_2$  дальнейшая фиксация прекращается и УВК вырабатывает световой или свето-звуковой сигнал. Накопленная информация выводится на внешние накопители, после чего программа регистрации аварийных ситуаций может быть снова включена в работу. Величина интервала  $T_2$  — до 15 мин.

Функция анализа действия защит заключается в формировании и выводе по запросу оператора на экран дисплейного модуля ДМ-2000 информации о первой сработавшей защите и результатах ее действия.

Функция автоматического расчета технико-экономических показателей (ТЭП) предусматривает представление персоналу электростанции текущей и отчетной информации о состоянии оборудования и качестве его эксплуатации по отдельным участкам технологического процесса, основным агрегатам и энергоблоку в целом. В состав вычисляемых показателей входят: показатели отдельных участков, корпусов и всего котла, основного турбогенератора, конденсационной установки, энергоблока в целом; баланс потерь конденсатора; внутренние относительные КПД цилиндров высокого давления и цилиндров среднего давления основной турбины; показатели, характеризующие состояние системы регенерации, турбопитательную установку, процесс пуска; нормативные показатели.

Для непосредственного использования технико-экономических показателей в ходе управления процессом предусматривается специальный интервал расчета показателей (оперативные ТЭП), вычисляемых за минимально возможное время. В целях подавления динамических помех величина оперативного интервала устанавливается 15 мин. Для анализа работы сменного персонала предусмотрен сменный (8 ч) интервал расчета, а для фиксации качества работы всего энергоблока и составления месячного технического отчета — месячный интервал.

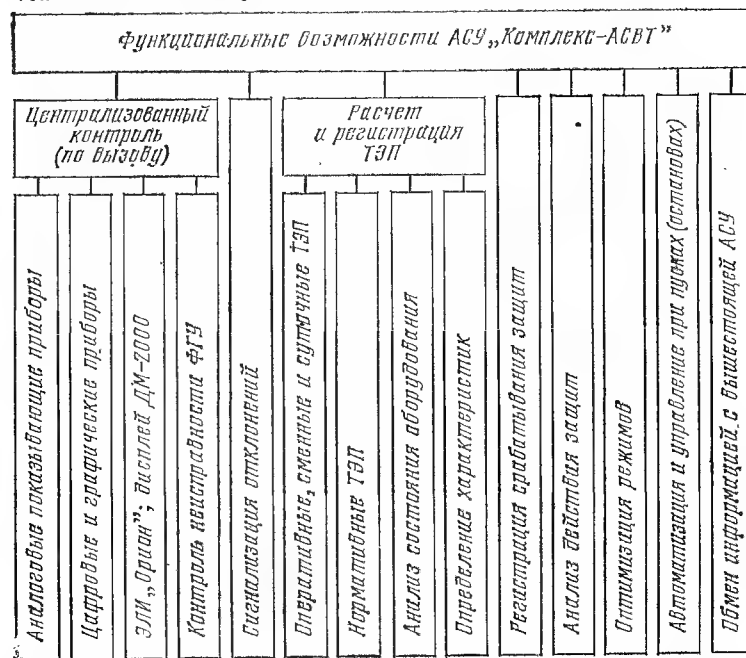


Рис. 6.31. Функциональная структура АСУ «Комплекс-АСВТ».

Предусмотрена специальная подпрограмма для вычисления термодинамических величин (удельный объем, энтальпия, энтропия) перегретого пара и воды. Система расчета ТЭП автоматически перестраивается при изменениях схемы энергоблока.

Функция оптимизации режимов предполагает оптимизацию процесса горения путем воздействия на расход воздуха, подаваемого в топку; оптимизацию давления острого пара для поддержания оптимального соотношения давления пара и положения регулирующих клапанов турбины; оптимизацию вакуума в конденсаторе турбины для определения оптимального расхода циркуляционной воды.

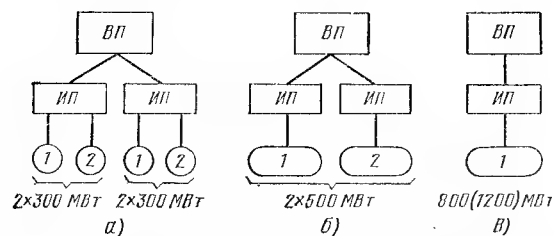


Рис. 6.32. Варианты структур УВК для энергоблоков большой мощности.  
а — для блоков 300 МВт; б — для блоков 500 МВт; в — для блоков 800 и 1200 МВт.

Автоматический пуск (останов) осуществляется управляющим вычислительным комплексом совместно с функциональными группами, локальными регуляторами, системами защит и блокировок.

Автоматическое регулирование выполняется как с помощью локальных регуляторов, так и путем непосредственного цифрового регулирования (НЦР). Управляющий вычислительный комплекс должен вырабатывать регулирующие воздействия для контуров с НЦР и задающие воздействия для локальных регуляторов, а также изменять параметры динамической настройки любых контуров регулирования в соответствии с заданными алгоритмами. Основные функции логического управления возлагаются при этом на функциональные группы. Кроме рассмотренных функций УВК осуществляется обмен информацией с вышестоящей подсистемой АСУ ТП ТЭС для расчета и анализа показателей работы электростанции в целом и составления отчетной документации.

Аппаратурно управляющий вычислительный комплекс реализован в виде двух ступеней. Нижнюю ступень составляет информационная подсистема (ИП), осуществляющая сбор и первичную обработку информации, оперативный контроль, сигнализацию, вызывную цифровую печать, графическую регистрацию. Верхнюю ступень занимает вычислительная подсистема (ВП), решающая задачи с более сложными алгоритмами.

Рекомендуются два варианта структуры УВК: для энергоблоков мощностью 300 и 500 МВт одна вычисли-

тельная подсистема на две информационные подсистемы, каждая из которых обслуживает или два блока мощностью 300 МВт (рис. 6.32,а), или один блок мощностью 500 МВт (рис. 6.32,б); для блоков мощностью 800 и 1200 МВт рекомендуется использование одной информационной подсистемы (рис. 6.32,в).

Для энергоблоков, введенных в эксплуатацию до 1977 г. информационная подсистема строилась на технических средствах в дискретном исполнении, а вычислительная подсистема — на базе двухпроцессорного комплекса М-6000 АСВТ-М. На энергоблоках, вводимых с 1979 г., информационные подсистемы поставляются в микросредоточном исполнении (комплекс М-60), а комплекс М-6000 в вычислительной подсистеме заменяется двухпроцессорным комплексом М-7000 с последующим переходом на машины системы СМ ЭВМ. Принципиальная структурная схема УВК системы «Комплекс-АСВТ» приведена на рис. 6.33.

В состав информационной подсистемы, реализованной на базе информационного комплекса М-60, входит устройство коммутации и преобразования аналоговых

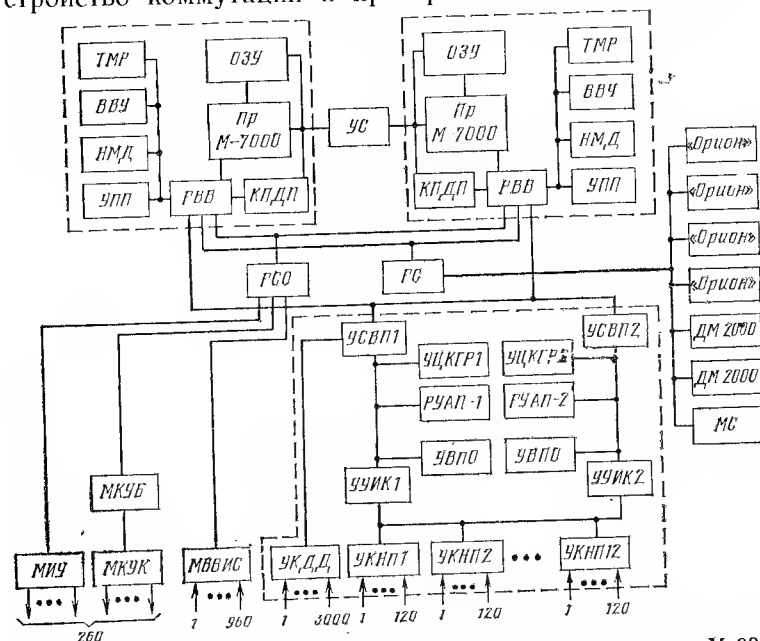


Рис. 6.33. Структурная схема УВК на базе ИП с комплексом М-60 и ВП с комплексом М-7000 АСВТ-М.

сигналов (УКНП), коммутация дискретных датчиков (УКДД), устройство управления информационным комплексом (УУИК), устройство цифрового контроля и графической регистрации (УЦКГР), устройство выработки и памяти отклонений (УВПО), имеющее выход на мнемосхему (МС), регистрирующее устройство по вызову с адресозадающим принципом (РУАП) и устройство связи с вычислительной подсистемой (УСВП).

Структура комплекса М-60 и основные характеристики перечисленных устройств рассмотрены в § 6.4.

Обмен информацией между устройствами, входящими в состав комплекса М-60, и вычислительной подсистемой организуется с помощью устройства УСВП и происходит по инициативе любого из двух процессоров М-7000. Информация передается тому процессору, с которым установлена связь.

Вычислительная подсистема представляет собой двухмашинный комплекс, построенный на базе двух типовых комплексов М-7000 АСВТ-М (ВК-1, ВК-2), работающих в режиме разделения задач и с взаимным резервированием по важнейшим функциям. В состав каждого вычислительного комплекса входят процессор Пр М-7000, выполняющий обработку поступающей в систему информации и управляющий работой устройств ввода-вывода; опартивное запоминающее устройство (ОЗУ); внешняя память на магнитных дисках (НМД); таймер (ТМР), обеспечивающий работу вычислительного комплекса в реальном масштабе времени; устройства ввода-вывода (ВВУ), обеспечивающие загрузку, отладку и контроль выполнения программ, ввод и изменение уставок и различных констант; устройство параллельной печати (УПП), предназначенное для вывода больших массивов информации; расширитель ввода-вывода, позволяющий подключать к комплексу до 16 терминалов по стандартному сопряжению 2К, а также канал прямого доступа в память (КПДП) для высокоскоростного обмена информацией между ОЗУ и быстродействующими терминалами. Совместное функционирование ВК-1 и ВК-2 осуществляется с помощью устройств связи (УС).

Кроме рассмотренных комплексов на схеме показаны разветвитель сопряжения 2К (РС) и разветвитель связи с объектом (РСО). Разветвитель сопряжения позволяет подключать дисплейные модули ДМ-2000 и устройство «Орион». К разветвителю связи с объектом подключа-

ются модули ввода инициативных сигналов (МВВИС) о срабатывании защит и изменении состояния двухпозиционных органов для реализации функции регистрации аварийных ситуаций и контроля неисправности работы устройств функционально-группового управления до 480 сигналов, а также модули импульсного управления (МИУ), модули кодового управления бесконтактные (МКУБ) и контактные (МКУК) для реализации программной сигнализации, организации управления путем непосредственного воздействия на исполнительные механизмы и изменения заданий локальным регулятором и устройствам функционально-группового управления (до 260 сигналов). Разветвители сопряжения и разветвители связи подключаются к обоим вычислительным комплексам через расширители ввода-вывода (РВВ).

Наличие в вычислительной подсистеме двух процессоров обеспечивает не только повышенную надежность, но и позволяет осуществлять отладку программ, проведение профилактических работ в любое время при сохранении основных функций системы.

С точки зрения программного обеспечения одной из главных задач является функционирование такой системы и программная реализация технологических алгоритмов. В состав программного обеспечения УВК в системе «Комплекс-АСВТ» входят:

- программы взаимосвязи и обмена информацией между подсистемами, а также между обоими процессорами вычислительной подсистемы;

- программы функционирования УВК, включающие операционную систему, систему подготовки программ, библиотечные, тестовые и диагностические программы;

- программы, реализующие алгоритмы технологических задач АСУ ТП.

Система «Комплекс-АСВТ» на базе комплекса М-6000 внедрена на Славянской ГРЭС (блок мощностью 800 МВт), Рязанской (4×300 МВт) и Ставропольской ГРЭС (4×300 МВт), на Киевской ТЭЦ-5 (2×250 МВт), Запорожской (3×800 МВт) и Угледорской (3×800 МВт) ГРЭС.

Внедрение АСУ на базе комплексов М-60 и М-7000 осуществляется на первых в СССР энергоблоке 1200 МВт Костромской ГРЭС и полупиковом энергоблоке мощностью 500 МВт Лукомльской ГРЭС.

По экспертным оценкам Минэнерго СССР и Минприбора СССР, внедрение лишь функции расчета техни-

ко-экономических показателей в полном объеме повышает экономичность работы энергоблока на 1—3%.

При автоматизации пусковых режимов энергоблока повышение экономичности достигается путем сокращения времени пуска, что уменьшает расход топлива, электроэнергии, теплоты и других составляющих потерь на пуск.

По данным ВТИ автоматизация процесса пуска только по проточной части турбинной установки дает повышение КПД энергоблока на 0,2—0,3%.

#### *в) Автоматизированная система управления мощными энергоблоками АЭС («Комплекс-УРАН»)*

На атомных электростанциях СССР создан ряд информационно-вычислительных систем, осуществляющих функции централизованного сбора информации, сигнализации отклонений, регистрации параметров, расчета технико-экономических показателей.

Система «Карат» на Белоярской АЭС выполнена на базе управляющей вычислительной машины второго поколения УМ-1-НХ. На ряде блоков ВВЭР-440 установлены машины ИВ-500.

На первом блоке Ленинградской АЭС (РБМК-1000) функционирует система «Скала» на базе машины второго поколения ВНИИЭМ-3 имеющей оперативную память до 28 Кслов 24-разрядных, быстродействие 40 000 операций/с и до 16 внешних устройств.

Машина ВНИИЭМ-3 обладает многими свойствами и характеристиками, приближающими ее к машинам третьего поколения, и в частности к системе АСВТ-М, на которой базируется АСУ ТП «Комплекс-УРАН» вновь строящихся электростанций. В качестве примера рассматривается автоматизированная система управления блоком БП-600 Белоярской АЭС.

Требования к АСУ ТП атомными энергоблоками по объему выполняемых функций в основном совпадает с требованиями к АСУ ТП тепловыми энергоблоками.

В состав АСУ ТП атомного энергоблока входят управляющий вычислительный комплекс, система управления основными технологическими агрегатами блока (в том числе система управления и защиты реактора (СУЗ), система управления главными циркуляционными насосами (СУ ГЦН), система управления турбогенераторами и др.), общецлочные системы контроля и управ-

ления и центральный операторский пункт управления энергоблоком.

Одним из основных агрегатов блока является ядерный реактор, система управления которого выполняется по двухуровневой иерархической структуре. Функции первого уровня обеспечивает автономная децентрализованная система управления и защиты (СУЗ).

Функции второго уровня (диагностику, оптимизацию, расчет ТЭП, выдачу советов и пр.) реализует управляющий вычислительный комплекс. Следует заметить, что в настоящее время для построения СУЗ изучаются возможности применения микро-ЭВМ.

Структурная схема управляющего вычислительного комплекса в системе «Комплекс-УРАН» практически не отличается от структуры УВК в системе «Комплекс-АСВТ» и состоит из вычислительной подсистемы, информационного комплекса, устройств отображения информации и ряда модулей и устройств связи с объектом.

Информационный комплекс построен на базе машины М-60 и предназначен для ввода и первичной обработки информации от аналоговых и дискретных датчиков, передачи информации в вычислительную подсистему, для контроля параметров на аналоговых и цифровых вызывных приборах и сигнализации отклонений определенной части параметров от нормы. Информационный комплекс может работать автономно или под управлением вычислительной подсистемы.

Вычислительная подсистема создана на базе двух вычислительных комплексов М-7000 АСВТ-М. Причина использования двух вычислительных комплексов та же, что и в АСУ «Комплекс-АСВТ». При выходе из строя одного вычислительного комплекса все его основные функции автоматически принимает на себя второй, частично прекращая выполнение неоперативных расчетов.

Совместное функционирование двух вычислительных комплексов в единой системе осуществляется с помощью специальных устройств связи, разветвителей сопряжения и разветвителей связи с объектом, позволяющих подключенным к ним терминалам работать с любым вычислительным комплексом, состав которых такой же, как и в системе «Комплекс-АСВТ».

Связь с оперативным персоналом обеспечивается с помощью устройств отображения информации «Орион»,

дисплейных модулей ДМ-2000, различных типов АЦПУ и элементов сигнализации.

По аналогии с системой «Комплекс-АСВТ» программное обеспечение «Комплекс-УРАН» состоит из программ функционирования УВК (общее ПО) и программ технологических задач (специальное ПО).

Программы функционирования обеспечивают ввод, обработку и диагностику на точность и достоверность поступающей информации, отображение информации, сигнализацию отклонений параметров, выдачу управляющих воздействий.



Рис. 6.34. Внешний вид пульта управления блоком БН-600 Белоярской АЭС.

Технологические программы осуществляют ядерно-физические расчеты, диагностику работы основного оборудования блока, технико-экономические расчеты отделений и всего блока в целом, оптимизацию работы реактора и другого основного оборудования блока, прямое цифровое управление, советы оператору, расчеты уставок сигнализации, диагностику измерительных каналов и основных контуров регулирования и др.

Внешний вид пульта управления блоком БН-600 Белоярской АЭС представлен на рис. 6.34.

В дальнейшем управляющие вычислительные комплексы в АСУ ТП АЭС (так же как и в АСУ ТП ТЭС) предполагается строить на машинах серии СМ ЭВМ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Условные обозначения и сокращения

- $x$  — входная величина;
- $y$  — выходная величина, в частном случае — регулируемая величина;
- $u$  — заданное значение регулируемой величины;
- $e$  — рассогласование между регулируемой величиной и ее заданным значением;
- $z$  — выходной сигнал регулирующего блока (или входной сигнал исполнительской части АСР);
- $\mu$  — регулирующее воздействие или перемещение регулирующего органа, а также сигнал на выходе исполнительного механизма;
- $\lambda$  — возмущающее воздействие на входе в объект по каналу регулирования;
- $v$  — возмущающее воздействие;
- $\xi$  — сигнал на выходе функциональной обратной связи регулятора;
- $\sigma$  — сигнал рассогласования между входом регулятора и выходом обратной связи;
- $\gamma$  — скважность импульсного сигнала;
- $W_{об}(p)$  — передаточная функция объекта; оператор, задающий линейную математическую модель объекта;
- $W_p(p)$  — передаточная функция регулятора;
- $W_{ус}(p)$  — передаточная функция усилителя;
- $W_{о.с.}(p)$  — передаточная функция обратной связи;
- $W_{и.ч.}(p)$ ,  $W_{у.ч.}(p)$ ,  $W_{и.м.}(p)$  — передаточные функции измерительной, управляющей частей регулятора и исполнительного механизма;
- $\Delta$  — абсолютная величина погрешности;
- $\Delta_n$  — зона нечувствительности;
- $\Delta_v$  — зона «возврата» устройств с релейными характеристиками;
- $K_{об}$  — коэффициент передачи объекта;
- $K_p$  — коэффициент передачи регулятора;
- $K_u$ ,  $K_{о.с.}$ ,  $K_{и.м.}$  — коэффициенты передачи усилителя, обратной связи и исполнительного механизма;
- $T_d$  — постоянная времени дифференцирования ПИД-регулятора;
- $T_i$  — постоянная времени интегрирования ПИД- или ПИ-регулятора;
- $T_c$  — постоянная И-регулятора или интегральной части ПИ-регулятора;
- $T_{и.м.}$  — постоянная времени исполнительного механизма;
- $S$  — скорость исполнительного механизма;
- $V_{св}$  — скорость заряда емкости в функциональной обратной связи электрического регулятора (скорость связи);
- $T_a$  — постоянная времени заряда емкости в функциональной обратной связи;
- $T_p$  — постоянная времени разряда емкости в функциональной обратной связи;



$\Delta t_n$  — длительность импульсов в пульсирующем режиме;  
 $T_{дф}$  — постоянная времени демфера;  
 $R_n$  — сопротивление нагрузки, сопротивление входных цепей приемника сигнала;  
 $R_{л}$  — сопротивление линии связи;  
 $Z(p)$  — комплексное сопротивление входной цепи и цепи обратной связи усилителя постоянного тока;  
 $p_{атм}$  — значение пневматического сигнала, соответствующего атмосферному давлению;  
 $p_{пит}$  — значение пневматического сигнала, соответствующего давлению питания;  
 $p_{н.п}$  — значение пневматического сигнала регулируемой величины, поступающего с измерительного преобразователя;  
 $p_{зд}$  — заданное значение пневматического сигнала регулируемой величины;  
 $p_{вх}$  — значение пневматического сигнала на входе устройства;  
 $p_{вых}$  — значение пневматического сигнала на выходе устройства;  
 $\alpha$  — проводимость регулируемого пневматического сопротивления (дресселя);  
 $\beta$  — проводимость нерегулируемого (постоянного) пневмосопротивления;  
 $p_0$  — значение опорного пневматического сигнала контрольной точки;  
 $\delta$  — диапазон дресселирования или диапазон пропорциональности, являющийся настроечным параметром в пневматических регуляторах;  
 П — пропорциональный;  
 И — интегральный;  
 ПИ — пропорционально-интегральный;  
 ПИД — пропорционально-интегрально-дифференциальный;  
 РД — реальный дифференцирующий;  
 АКЭСР — агрегатный комплекс электрических средств регулирования;  
 АСВТ-Д — агрегатная система средств вычислительной техники на дискретных полупроводниковых элементах;  
 АСВТ-М — агрегатная система средств вычислительной техники на микромодульной основе;  
 АСР — автоматическая система регулирования;  
 АСУ — автоматизированная система управления;  
 АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическим процессом;  
 АТК — автоматизированный технологический комплекс;  
 АЦП — аналого-цифровой преобразователь;  
 АЦПУ — алфавитно-цифровое печатающее устройство;  
 БИС — большая интегральная схема;  
 БСП — библиотека стандартных подпрограмм;  
 БЩУ — блочный щит управления;  
 ВЗУ — внешнее запоминающее устройство;  
 ГСП — государственная система приборов и средств автоматизации промышленного назначения;  
 ДОС — дисковая операционная система;  
 ДОС РВ — дисковая операционная система реального времени;  
 ЕС ЭВМ — единая система электронных вычислительных машин;

ИВК — информационный вычислительный комплекс;  
 ИМ — исполнительный механизм;  
 КГДП — канал прямого доступа в память;  
 КТС ЛИУС — комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем;  
 МО — математическое обеспечение;  
 НМД — накопитель на магнитном диске;  
 НМЛ — накопитель на магнитной ленте;  
 НЦУ — непосредственное цифровое управление;  
 ОЗУ — оперативное запоминающее устройство;  
 ОС — операционная система;  
 ОС РВ — операционная система реального времени;  
 ПЗУ — постоянное запоминающее устройство;  
 ПО — программное обеспечение;  
 ПОТ — пульт оператора-технолога;  
 ППП — пакет прикладных программ;  
 Пр — процессор;  
 ПУ — периферийное устройство;  
 СМ ЭВМ — система малых электронных вычислительных машин;  
 СПО — система программного обеспечения;  
 СВВ — супервизор реального времени;  
 ТМР — таймер;  
 ТОУ — технологический объект управления;  
 ТЭЗ — типовой элемент замены;  
 ТЭП — технико-экономический показатель;  
 УВВ — устройство ввода-вывода;  
 УВК — управляющий вычислительный комплекс;  
 УВМ — управляющая вычислительная машина;  
 УВПК — устройство вывода на перфокарту;  
 УВПЛ — устройство вывода на перфоленту;  
 УВВПК — устройство ввода с перфокарты;  
 УВВПЛ — устройство ввода с перфоленты;  
 УВС — управляющая вычислительная система;  
 УЛУ — устройство логического управления;  
 УСЭППА — унифицированная система элементов промышленной пневмоавтоматики;  
 УСОП — устройство связи с оперативным персоналом;  
 УСО — устройство связи с объектом;  
 УУ — устройство управления;  
 УУПУ — устройство управления периферийным устройством;  
 ФГУ — функционально-групповое управление;  
 ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь;  
 ЦЩУ — центральный щит управления;  
 ЭВМ — цифровая электронная вычислительная машина.



# **Краткие сведения о второй очереди аппаратуры АКЭСР \***

Группа I. Регулирующие приборы РП-4. Приборы относятся к классу регулирующих блоков релейно-импульсного действия, преобразуют входной сигнал в скажность командных импульсов для управления исполнительным механизмом постоянной скорости, в сочетании с которым реализуют ПИ-закон регулирования.

Виды исполнения прибора:

прибор РП-4У рассчитан на прием четырех унифицированных сигналов постоянного тока 0—5 мА (0—20 мА);

прибор РП-4Т рассчитан на входной сигнал от термпар или термометров сопротивления;

прибор РП-4П рассчитан на входной сигнал от датчиков переменного тока (дифференциально-трансформаторные, индуктивные или ферродинамические).

В приборах РП-4 предусмотрено дистанционное изменение параметров динамической настройки, а также имеется внутренний задатчик с унифицированным выходным сигналом.

Группа II. Функциональные блоки динамических преобразований. БДС — универсальный аналоговый блок динамических преобразований. Может выполнять функции дифференцирования, интегрирования, аperiodического и пропорционального звеньев в различном их сочетании. Обеспечивает возможность дистанционного изменения постоянной времени и коэффициента передачи. Входная цепь блока БДС аналогична входной цепи блока РП-4У. Имеется выход как по току, так и по напряжению.

Блок БЗИ — блок задающий с импульсным управлением (блок импульсного интегрирования), выполняет функции интегрирующего задатчика с дистанционным импульсным управлением по трехпроводной линии связи и обеспечивает запоминание выходного сигнала на неограниченное время, а также дистанционное дискретное изменение постоянной времени интегрирования. Блок БЗИ совместно с регулирующим прибором РП-4У может использоваться в качестве корректирующего ПИ-регулятора с аналоговым унифицированным выходным сигналом по току и по напряжению.

Группа III. Функциональные блоки статических преобразований. Блок БСД — блок суммирования (и демпфирования); формирует выходной сигнал, пропорциональный алгебраической сумме входных сигналов (включая сигнал от задатчика) в диапазоне от —5 до +5 мА. Блок имеет входной узел, демпфер и встроенный задатчик, которые аналогичны используемым в приборе РП-4У.

Блок БНП — блок нелинейного преобразования; обеспечивает реализацию произвольной нелинейной зависимости методом кусочно-линейной аппроксимации шестью линейными участками. Вход и выход рассчитаны на токовый сигнал.

Блок БСЛ — блок селектирования; позволяет автоматически выделить наибольший или наименьший сигнал из четырех токовых входных сигналов с фиксацией адреса выделенного канала.

Блок БВО — блок вычислительных операций; содержит два сумматора токовых сигналов (на два и три входа соответственно), выходные сигналы которых могут подвергаться операции умножения или деления.

Блок БСС — блок суммирования и сигнализации (аналого-релейного преобразования); обеспечивает сигнализацию отклонения алгебраической суммы трех входных сигналов за пределы двух порогов срабатывания (уставок), а также может использоваться в качестве нуля-органа и трехпозиционного регулятора.

Все рассмотренные блоки имеют гальваническое разделение входных цепей.

Группа IV. Средства оперативного управления и вспомогательные устройства. Блок БРУ-32 — блок ручного управления регулятором; содержит переключатель выходных цепей релейно-импульсных регулирующих приборов РП-4 с автоматического на ручное дистанционное управление и обратно, кнопки ручного управления исполнительным механизмом, стрелочный индикатор для контроля положения регулирующего органа, а также устройство сигнализации аварийного отключения исполнительных цепей от регулирующего прибора.

Блок БРУ-22 — блок переключения цепей; обеспечивает ручное или дистанционное переключение цепей какого-либо устройства с заполнением последней поданной команды и индикацией состояния контактов реле.

Блок РЗД1 — ручной задатчик широкодиапазонный; формирует задание в виде унифицированного сигнала, изменяемого в полном диапазоне (от 0 до 100%).

Блок РЗД2 — ручной задатчик узкодиапазонный; представляет собой переменный резистор и позволяет осуществлять дистанционное изменение задания на 10%; рассчитан на подключение к специальному входу регулирующих или функциональных блоков.

Блок ЗУ — защитное устройство; используется для сохранения тока в цепи источника с унифицированным токовым сигналом при подключении к нему нескольких потребителей в случае обрыва цепи у одного из потребителей; содержит несколько последовательно включенных кремниевых стабилитронов и имеет нелинейную вольт-амперную характеристику; подключается параллельно защищаемому участку цепи.

Группа V. Исполнительные устройства. В комплекте с регулирующими приборами РП-4 можно использовать те же исполнительные устройства, что и с регулирующими блоками РБИ первой очереди АКЭСР.

\* Всережимный комплект средств автоматического регулирования/ А. И. Жирнов, В. Л. Алексеев, Ю. В. Захаров и др. — Теплоэнергетика, 1981, № 10, с. 6—10.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Состав управляющих вычислительных комплексов на базе мини-ЭВМ СМ-4 и микро-ЭВМ СМ-1800 приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Состав основных модификаций управляющих вычислительных комплексов на базе процессора СМ-4П

| Наименование модулей и устройств                                             | Условные обозначения | Марки комплекса |            |         |            |            |            |            |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|------------|---------|------------|------------|------------|------------|
|                                                                              |                      | СМ 1403.01      | СМ 1403.05 | СМ 1405 | СМ 1405.01 | СМ 1405.02 | СМ 1405.03 | СМ 1407.01 |
| Процессор                                                                    | СМ-4П                | 1               | 1          | 1       | 1          | 1          | 1          | 1          |
| Устройство оперативной памяти емкостью 32 Кбайта                             | УОП                  | 4               | —          | 2       | 2          | —          | —          | —          |
| Полупроводниковое оперативное запоминающее устройство емкостью 128 Кбайт     | ОЗУ-П                | —               | 1          | —       | —          | 1          | 1          | 2          |
| Устройство внешней памяти на магнитных дисках емкостью 29 Кбайт              | УВПМД                | 1               | 1          | 1       | 1          | 1          | 1          | 1          |
| Устройство внешней памяти на магнитной ленте                                 | УВПМЛ                | 1               | 1          | —       | —          | —          | —          | 1          |
| Устройство ввода с перфокарты                                                | УВЫПЛ                | —               | —          | —       | —          | —          | —          | 1          |
| Алфавитно-цифровое печатающее устройство последовательного типа              | ДЗМ-180              | —               | 2          | 1       | 1          | —          | —          | —          |
| Устройство вывода на печать параллельное                                     | УВ АЦПУ              | 1               | —          | —       | —          | 1          | 1          | 1          |
| Видеотерминал алфавитно-цифровой на базе дисплея "Видеотон-340"              | ВТ-340               | 3               | 1          | 2       | 2          | 1          | 1          | 1          |
| Широкоформатный графический экран с пультом проектирования                   | ШГ ЭПП               | —               | —          | —       | —          | —          | —          | 1          |
| Блок расширения системы                                                      | БРС                  | 1               | 1          | 1       | 1          | 1          | 1          | 1          |
| Устройство сопряжения с вычислительной машиной                               | УС ВМ                | —               | —          | —       | —          | —          | —          | 1          |
| Устройство согласования сопряжений ОШ и 2К                                   | УСС ОЩ/2К            | —               | —          | 1       | 1          | 1          | 1          | —          |
| Расширитель интерфейса                                                       | РИФ СМ               | 1               | 1          | 1       | 1          | 1          | 1          | 1          |
| Устройство считывания и преобразования графической информации в цифровой код | УПИ                  | —               | —          | —       | —          | —          | —          | —          |
| Модуль аналого-цифрового преобразования                                      | МАЦП                 | —               | —          | 1       | —          | 4          | —          | —          |
| Коммутатор бесконтактный                                                     | КБ                   | —               | —          | 4       | —          | 16         | —          | —          |
| Модуль нормализации                                                          | МН                   | —               | —          | 7       | 10         | 8          | 22         | —          |
| Модуль фильтров                                                              | МФ                   | —               | —          | 2       | —          | 8          | —          | —          |
| Модуль гальванической развязки                                               | МГР                  | —               | —          | 1       | 2          | —          | 4          | —          |

Продолжение табл. 1

| Наименование модулей и устройств         | Условные обозначения | Марки комплекса |            |         |            |            |            |            |
|------------------------------------------|----------------------|-----------------|------------|---------|------------|------------|------------|------------|
|                                          |                      | СМ 1403.01      | СМ 1403.05 | СМ 1405 | СМ 1405.01 | СМ 1405.02 | СМ 1405.03 | СМ 1407.01 |
| Коммутатор дискретных сигналов входной   | КДСВ                 | —               | —          | 1       | 1          | 1          | 1          | —          |
| Модуль кодового управления бесконтактный | МКУБ                 | —               | —          | 5       | 6          | 8          | 12         | —          |
| Модуль вывода импульсных сигналов        | МВИС                 | —               | —          | 3       | 2          | 8          | 4          | —          |
| Модуль ввода-вывода дискретных сигналов  | МВВДС                | —               | —          | 8       | 12         | 8          | 24         | —          |
| Преобразователь код-ток                  | ПКТ                  | —               | —          | 1       | —          | 2          | —          | —          |
| Модуль ввода инициативных сигналов       | МВВИС                | —               | —          | 6       | 8          | 8          | 16         | —          |

Примечание. Модификации комплексов на базе ЭВМ СМ-4 имеют целевую направленность:

СМ 1403 — для самостоятельного применения или для построения специфицированных управляющих вычислительных комплексов (СУВК);

СМ 1405 — для использования в АСУ ТП с развитым УСО комбинированного состава или в автоматизированных системах научных исследований (АСНИ);

СМ 1407 — для применения в системах автоматизации рабочих мест (АРМ).

Таблица 2. Состав вычислительных комплексов на базе микро-ЭВМ СМ-1800

| Наименование модулей и устройств                   | Условные обозначения | Номер комплекса |   |   |
|----------------------------------------------------|----------------------|-----------------|---|---|
|                                                    |                      | 1               | 2 | 3 |
| Модуль центрального процессора                     | МЦП                  | 1               | 1 | 1 |
| Блок расширения                                    | БР                   | —               | 1 | 1 |
| Блок кроссовый                                     | БК                   | —               | 1 | 1 |
| Модуль таймера                                     | МТР                  | 1               | 1 | 1 |
| Модуль оперативный запоминающий емкостью 32 Кбайта | МОЗ                  | 2               | 2 | 2 |
| Модуль постоянный запоминающий емкостью 4 Кбайта   | МПЗ                  | 1               | 1 | 1 |
| Модуль ввода дискретных сигналов на 16 каналов     | МВВД                 | —               | 2 | 2 |
| Модуль ввода дискретных сигналов на 8 каналов      | МВВД                 | —               | 1 | 1 |

| Наименование модулей и устройств                                         | Условие обозначения  | Номер комплекса |   |   |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|---|---|
|                                                                          |                      | 1               | 2 | 3 |
| Модуль ввода число-импульсных сигналов на 2 канала                       | МВвЧ                 | —               | 1 | 1 |
| Модуль ввода аналоговых сигналов на 16 каналов                           | МВвА                 | —               | 1 | 1 |
| Модуль вывода аналоговых сигналов на 4 канала                            | МВА                  | —               | 1 | 1 |
| Модуль компараторов уровня на 8 каналов                                  | МКУ                  | —               | 1 | 1 |
| Модуль аналогового питания                                               | МАП                  | —               | 1 | 1 |
| Модуль резервного питания                                                | МРП                  | —               | 1 | 1 |
| Устройство внешней памяти на гибких магнитных дисках                     | УВПГМД               | 1               | 1 | 1 |
| Видеотерминал алфавитно-цифровой                                         | ВТА                  | 1               | 1 | 1 |
| Устройство печатающее алфавитно-цифровое                                 | УПА                  | 1               | 1 | 1 |
| Устройство ввода-вывода перфолен-точное                                  | УВВЛ                 | —               | — | 1 |
| Пульт контроля и управления                                              | ПКУ                  | 1               | 1 | 1 |
| Комплект программного обеспечения                                        | СПО СМ-1800          | 1               | 1 | 1 |
| Комплект тестового обеспечения                                           | СТО СМ-1800          | 1               | 1 | 1 |
| Модуль постоянный запоминающий с записанным тестом для модуля процессора | МПЗ с тестом для МЦП | 1               | 1 | 1 |
| Тумба 725×600×800 мм                                                     | —                    | 1               | 2 | 2 |
| Стол 1200×800 мм для ВТА и рабочего места оператора                      | —                    | 1               | 1 | 1 |

Примечание. Возможны различные конструктивные компоновки СМ-1800, ориентированные на конкретные области применения:

1) кассетный вариант — для встраивания в установок, производимые заказчиком;

2) настольный вариант — использование микро-ЭВМ для научных экспериментов и создания автоматизированных лабораторных систем;

3) тумбовый вариант — для выполнения расчетных работ и создания низовых подсистем АСУП;

4) стойный вариант — использование микро-ЭВМ для автоматизации производственных установок и технологических процессов.

### Список литературы

1. Веллер В. Н. Автоматическое регулирование паровых турбин. — М.: Энергия, 1967.—416 с.
2. Кохтев А. А. Основы стандартизации в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1973.—352 с.
3. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. — М.: Энергия, 1978.—704 с.
4. Штейнберг Ш. Е., Хвильевский Л. О., Ястребенецкий М. А. Промышленные автоматические регуляторы. — М.: Энергия, 1973.—568 с.
5. Ястребенецкий М. А., Соляник Б. Л. Надежность промышленных автоматических систем в условиях эксплуатации. — М.: Энергия, 1978.—168 с.
6. Иванова Г. М. Элементы теории надежности. — М.: МЭИ, 1978.—83 с.
7. Ротач В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. — М.: Энергия, 1973.—440 с.
8. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы. Под ред. Б. Д. Кошарского. — Л.: Машиностроение, 1976.—488 с.
9. Фалькович В. Н. Средства автоматического регулирования тепловых процессов на электростанциях. Вып. 1, 2. — М.: Энергия, 1977.—104 с, 124 с.
10. Яковлев Ю. С., Мальгин О. А., Камчаткин А. П. Технические средства локальных САР (Чебоксарского ЗЭИМ). — Чебоксары: Чувашское книжное изд-во, 1973.—336 с.
11. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Электрическая унифицированная система приборов автоматического регулирования «Каскад». Каталог, 3, вып. 4 — М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1974.—56 с.
12. Справочник по автоматизации и средствам контроля производственных процессов. Кн. 6. Комплексная автоматизация технологических процессов, производств и промышленных предприятий. — М.: Недра, 1972.—696 с.
13. Плетнев Г. П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок электрических станций. Изд. 2-е. — М.: Энергия, 1976.—424 с.
14. Гальперин М. В., Злобин Ю. П., Павленко В. А. Усилители постоянного тока. Изд. 2-е. — М.: Энергия, 1978.—248 с.
15. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Агрегатный комплекс электрических средств регулирования в микроэлектронном исполнении АКЭСР. Каталог, т. 4, Вып. 3. — М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1980.—120 с.
16. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Каталог, т. 2, вып. 6. — М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1975.—78 с.
17. Берендс Т. К., Ефремова Т. К., Тагаевская А. А. Элементы